

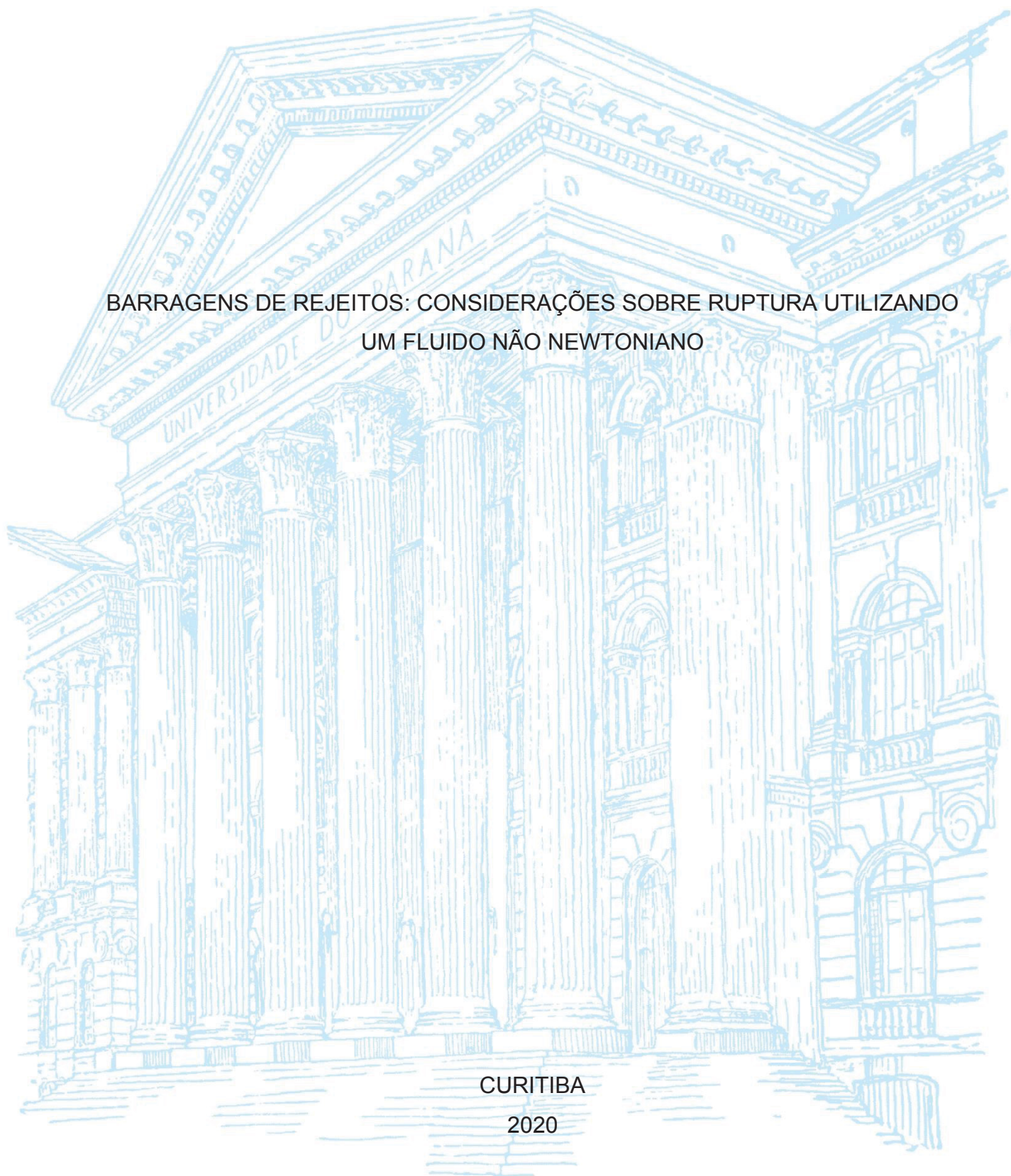
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CEZAR FALAVIGNA SILVA

BARRAGENS DE REJEITOS: CONSIDERAÇÕES SOBRE RUPTURA UTILIZANDO
UM FLUIDO NÃO NEWTONIANO

CURITIBA

2020



CEZAR FALAVIGNA SILVA

BARRAGENS DE REJEITOS: CONSIDERAÇÕES SOBRE RUPTURA UTILIZANDO
UM FLUIDO NÃO NEWTONIANO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Tonso Fabiani

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S586b Silva, Cezar Falavigna
Barragens de rejeitos: considerações sobre ruptura utilizando um fluido não newtoniano
[recurso eletrônico] Cezar Falavigna Silva. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2020.

Orientador: André Luiz Tonso Fabiani.

1. Barragens de rejeitos. 2. Fluidos não-newtonianos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Fabiani, André Luiz Tonso. III. Título.

CDD: 627.8

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **CEZAR FALAVIGNA SILVA** intitulada: **Barragens de Rejeitos: Considerações sobre Ruptura Utilizando um Fluido Não Newtoniano**, sob orientação do Prof. Dr. ANDRE LUIZ TONSO FABIANI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Maio de 2020.

Assinatura Eletrônica

22/05/2020 17:32:44.0

ANDRE LUIZ TONSO FABIANI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

22/05/2020 17:33:14.0

ROBERTA BRONDANI MINUSSI

Avaliador Externo (null)

Assinatura Eletrônica

25/05/2020 15:25:19.0

JOSÉ JUNJI OTA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

22/05/2020 17:34:25.0

ALEXANDRE KOLODYNISKIE GUETTER

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

22/05/2020 17:41:25.0

SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA

Avaliador Externo (null)

Dedico essa dissertação para minha família, pelo exemplo de conduta, amor, ética, respeito e educação. Este trabalho só pode ser desenvolvido por vocês serem minha base em qualquer situação, portanto, dedico a vocês e a todos os seus esforços feitos para mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço minha família, meus pais, Manoel e Ana Maria, minhas irmãs, Paula e Natália, por todo o suporte dado não só durante o mestrado, mas em toda a minha vida. Sem as lições, ensinamentos, educação, convivência, amor, carinho e zelo não chegaria a essa etapa de minha vida. Com certeza sem a presença de vocês, nada disso seria possível. Um agradecimento especial aos meus tios e tias, primos e primas, por todas as conversas, ideias, dicas e afeto demonstrados em minha vida.

Um muito obrigado aos professores de toda essa trajetória, desde a época de graduação até o final do mestrado, especialmente os professores Sidnei Teixeira, Victor Faro, Daniel Detzel e principalmente meu orientador André Fabiani e o professor Mauro Lacerda Filho.

Aos meus colegas que já conhecia e os que conheci neste período, obrigado pela convivência, risadas, brincadeiras, troca de informações, angústias, ideias, almoços e jantares no Restaurante Universitário da UFPR. Em especial aos de grupos mais próximos nessa pós-graduação, Bernardo Opolski, Elaine Latocheski, Felipe Diniz, Gabrielle Ramos, Gean Warmling, Jacqueline Carril, Leandro Stival, Luiz Otávio Peixoto, Natan Ricci, Paulo Gnatta, Ramon Corrêa, Robinson Ploszai, Vinícius Coelho e Vinícius Granadier. Também não poderia deixar de agradecer os amigos de Escritório Modelo de Engenharia Civil (EMEA/UFPR), José Hino Júnior, Gabriela Domingues, Ian Esteves, Eduarda Lauck, os estagiários que passaram pelo escritório e os que deram suporte para o EMEA, Dyeison Mlenek e Elton Jose.

Obrigado a todos técnicos e terceirizados que ajudaram nesta dissertação, seja dentro de um laboratório, seja servindo as refeições do RU ou limpando as dependências da instituição, seja na parte administrativa do programa de pós-graduação e dos departamentos. O trabalho de vocês, muitas vezes invisível nas páginas deste estudo, foi essencial para eu conseguir completar essa jornada e merece meus eternos agradecimentos.

Por último, um agradecimento aos amigos que não participaram diretamente da dissertação, porém o convívio sempre foi muito importante, colegas de escola, dos amigos de Londrina/PR e principalmente meu afilhado. Agradeço muito a todos.

Existe a atitude de desaprovação ignorante, e existe a atitude de admiração acrítico, mas pouco há entre as duas. (George Orwell, 1946)

RESUMO

Nos últimos anos, o Brasil presenciou dois acidentes de grandes proporções envolvendo barragens de rejeito; este tipo de barragem está presente em todo território nacional em virtude da forte atividade mineradora do país. O Plano de Ações Emergenciais exige que, para os barramentos enquadrados na lei 12.334/2010, estudos a fim de verificar a mancha de inundação em uma eventual ruptura, sejam realizados. O material liberado por essas barragens não possui propriedades iguais às da água, ou seja, apresenta densidade e viscosidade diferentes; os fluidos desse tipo são considerados não newtonianos. O presente trabalho investiga essas propriedades através de ensaios de reometria em um fluido de água com solo fino (argila e silte) no qual ficou constatado que quanto menor for a quantidade de água, mais difícil será a capacidade de escoar. Uma pequena diferença de valores na quantidade de água já exige uma tensão muito maior para que o fluido comece a se movimentar. Foi analisada a mancha de inundação, gerada pelo software *RiverFlow2D*, em um cenário hipotético de ruptura de uma barragem na região de Mariana/MG, destacando as diferenças entre as situações estudadas. Para se saber o volume liberado na ruptura, foi utilizado um software para avaliar a estabilidade em três dimensões (*Slide 3*) de um paramento e seu respectivo reservatório de rejeito. Foi simulada a situação de carregamento sísmico e propriedades respectivas após a liquefação do material.

Palavras-chave: Barragens de rejeitos. Fluido não newtoniano. Mapa de inundação. Liquefação. Ruptura de Barragens. *RiverFlow2D*.

ABSTRACT

Tailings dams are spread all over the Brazilian territory due to Brazil's strong mining business and recently there were two major failures with catastrophic consequences. Dams that the law 12.334/2010 is applied, must have studies that verify the inundation zone for the Emergency Action Plan (Plano de Ações Emergenciais – PAE). The material released by tailings dams doesn't have the same proprieties of water, they have different density and viscosity, resembling a non-newtonian fluid. Because of this, this research investigated these proprieties through rheology tests on a fluid with water and fine soil (clay and silt), in which it was possible to imply that with less water, it is harder for the mixture to flow. A slight difference in the water volume applied to the mixture demands greater stress for the fluid to flow. This study used a hypothetical dam break scenario in Mariana/MG region, the simulation was done using RiverFlow 2D software and it was highlighted the differences between the proposed scenarios. To know how much material would be released in this failure a 3D slope stability model was be used using RocScience's Slide 3. It was applied a seismic load and post liquefaction material properties.

Keywords: Tailings dams. Non-Newtonian fluid. Inundation zone. Liquefaction. Dam failure. RiverFlow2D.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – INUNDAÇÃO RUPTURA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA/MG	17
FIGURA 2 – INUNDAÇÃO RUPTURA BARRAGEM B-I EM BRUMADINHO/MG.....	18
FIGURA 3 – IMAGENS DA RUPTURA DA BARRAGEM B-I EM BRUMADINHO/MG	19
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DE UM TIPO DE PROCESSO DE TRATAMENTO DO MINÉRIO.....	24
FIGURA 5 – REJEITO EM PASTA.....	25
FIGURA 6 – CURVA DE RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO VS. CONCENTRAÇÃO MATERIAL	26
FIGURA 7 – DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	27
FIGURA 8 – UTILIZAÇÃO DE SPIGOTS.....	27
FIGURA 9 – FUNCIONAMENTO DO HIDROCICLONE	28
FIGURA 10 – ARRANJO TÍPICO DE HIDROCICLONES	29
FIGURA 11 – MÉTODO DE LINHA A MONTANTE	31
FIGURA 12 – MÉTODO DE LINHA A JUSANTE	31
FIGURA 13 – MÉTODO DE LINHA DE CENTRO.....	32
FIGURA 14 – DEFINIÇÃO DO RISCO HIDRODINÂMICO	37
FIGURA 15 – LINHA DE ESTADO CRÍTICO (<i>CRITICAL STATE LINE</i> – CSL).....	39
FIGURA 16 – PONTO DE ESTADO PERMANENTE E PONTO DE COLAPSO	40
FIGURA 17 – SUPERFÍCIE DE COLAPSO (<i>COLLAPSE SURFACE</i>).....	41
FIGURA 18 – LINHA DE ESTADO CRÍTICO (CSL) E LINHA DE FLUXO POR LIQUEFAÇÃO (FLS).....	41
FIGURA 19 – COMPORTAMENTO SOBRE A LINHA DE ESTADO CRÍTICO.....	42
FIGURA 20 – COMPORTAMENTO DE SOLOS SOLTOS DURANTE O CISALHAMENTO NÃO DRENADO (STRAIN SOFTENING).....	42
FIGURA 21 – LIQUEFAÇÃO POR CARREGAMENTO CÍCLICO	43
FIGURA 22 – APLICAÇÃO DO COEFICIENTE DE ACELERAÇÃO SÍSMICA.....	46
FIGURA 23 – RELAÇÃO ENTRE TENSÃO EFETIVA VERTICAL E RESISTÊNCIA NÃO DRENADA PÓS-LIQUEFAÇÃO	47
FIGURA 24 – SUSCEPTIBILIDADE DOS MATERIAIS À LIQUEFAÇÃO: CRITÉRIO SEED ET AL.	49

FIGURA 25 – GEOMETRIA IDEALIZADA PARA ANÁLISE DO EQUILÍBRIO DE FORÇAS	50
FIGURA 26 – CARTA DE ESTABILIDADE	51
FIGURA 27 – CURVA DE RESISTÊNCIA E DE VOLUME	52
FIGURA 28 – TENSÃO DE CISALHAMENTO	56
FIGURA 29 – GEOMETRIA DOS REÔMETROS ROTACIONAIS	57
FIGURA 30 – ESCOAMENTO EM CANAL	59
FIGURA 31 – FORÇAS ATUANTES EM UM ESCOAMENTO EM CANAL	60
FIGURA 32 – MODELOS DE FLUIDOS E RESPECTIVOS SOFTWARES	66
FIGURA 33 – ENSAIO DE DENSIDADE DOS GRÃOS	70
FIGURA 34 – CURVA GRANULOMÉTRICA AMOSTRA 1 – ENSAIO 1	71
FIGURA 35 – CURVA GRANULOMÉTRICA AMOSTRA 1 – ENSAIO 2	72
FIGURA 36 – CURVA GRANULOMÉTRICA AMOSTRA 2 – ENSAIO 2	72
FIGURA 37 – REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ	73
FIGURA 38 – LOCALIZAÇÃO DA AMOSTRA N° 7 DA COLETA EM BRUMADINHO	75
FIGURA 39 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL COLETADO EM BRUMADINHO	75
FIGURA 40 – DENSIDADE DOS GRÃOS PARA A AMOSTRA DA BARRAGEM B-I (BRUMADINHO)	76
FIGURA 41 – VARIAÇÃO DO CV(%) COM A PROFUNDIDADE, TEMPO E CISALHAMENTO	80
FIGURA 42 – ENSAIO REOLÓGICO UTILIZANDO A PALHETA COAXIAL (VANE)	80
FIGURA 43 – COMPORAMENTOS PARA FLUIDO NO SOFTWARE RIVERFLOW 2D	94
FIGURA 44 – SEÇÃO ORIGINAL E SEÇÃO UTILIZADA DO BARRAMENTO NO ESTUDO	97
FIGURA 45 – ALTEAMENTOS DA BARRAGEM ORIGINAL E VOLUMES ACUMULADOS	98
FIGURA 46 – PLANTA COM BARRAGEM PARA JUSANTE E ALTEAÇÃO COM BARRAGEM PARA MONTANTE	98
FIGURA 47 – MALHA UTILIZADA NAS SIMULAÇÃO E RESPECTIVO DETALHE	100

FIGURA 48 – MODELO 3D BARRAGEM (EL.760m) E RESERVATÓRIO (EL.755m)	101
FIGURA 49 – MODELO 3D BARRAGEM (EL.790m) E RESERVATÓRIO (EL.785m)	101
FIGURA 50 – MODELO 3D BARRAGEM (EL.810m) E RESERVATÓRIO (EL.805m)	102
FIGURA 51 – MODELO 3D BARRAGEM (EL.840m) E RESERVATÓRIO (EL.835m)	102
FIGURA 52 – RUPTURAS GLOBAIS GERADAS PELO MODELO NUMÉRICO EL. 840m	103
FIGURA 53 – RUPTURA DA CUNHA COM MAIOR VOLUME APRESENTADO	104
FIGURA 54 – TRAJETÓRIA DE TENSÕES PARA ESFORÇOS LATERAIS	105
FIGURA 55 – DIFERENÇA NOS DADOS TOPOGRÁFICOS DO TERRENO E BARRAGEM	106
FIGURA 56 – ALTERAÇÕES GERADAS NA INTERAÇÃO BARRAGEM/TERRENO	107
FIGURA 57 – MDE DO TERRENO E IMAGEM DE SATÉLITE DA REGIÃO	109
FIGURA 58 – RESULTADOS PARA ELEVAÇÃO DA COTA MÁXIMA (EM METROS) EL. 760m	111
FIGURA 59 – PRINCIPAIS PONTOS DE DIFERENÇA COM OS OUTROS CENÁRIOS	112
FIGURA 60 – COMPARAÇÃO INUNDAÇÃO PARA EL. 760m	113
FIGURA 61 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA PROFUNDIDADE (EM METROS) PARA EL. 760m	113
FIGURA 62 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA VELOCIDADE MÁXIMA (m/s) PARA EL. 760m	114
FIGURA 63 – RESULTADOS NUMÉRICOS DO RISCO HIDRODINÂMICO (m ² /s) PARA EL. 760m	115
FIGURA 64 – DIFERENÇAS ENTRES OS MODELOS DE BINGHAM COMPLETO E SIMPLIFICADO PARA O MATERIAL DE BRUMADINHO/MG	117
FIGURA 65 – RESULTADOS PARA TEMPO PARA NÍVEL MÁXIMO (EM HORAS) PARA EL. 760m	118
FIGURA 66 – RESULTADOS PARA TEMPO CHEGADA DA ONDA (EM HORAS) PARA EL. 760m	119

FIGURA 67 – RESULTADOS PARA ELEVAÇÃO DA COTA MÁXIMA (EM METROS) EL. 790m.....	120
FIGURA 68 – DETALHE COMPARATIVO DOS RESULTADOS PARA ELEVAÇÃO DA COTA MÁXIMA (EM METROS) EL. 790m.....	122
FIGURA 69 – COMPARAÇÃO INUNDAÇÃO EL. 790m	123
FIGURA 70 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA PROFUNDIDADE (EM METROS) PARA EL. 790m	124
FIGURA 71 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA VELOCIDADE MÁXIMA (m/s) PARA EL. 790m.....	126
FIGURA 72 – RESULTADOS NUMÉRICOS DO RISCO HIDRODINÂMICO (m ² /s) PARA EL. 790m	127
FIGURA 73 – DETALHE COMPARATIVO PARA O RISCO HIDRODINÂMICO NA EL. 790m.....	129
FIGURA 74 – RESULTADOS PARA TEMPO PARA NÍVEL MÁXIMO (EM HORAS) PARA EL. 790m	129
FIGURA 75 – RESULTADOS PARA O TEMPO CHEGADA DA ONDA (HORAS) PARA EL. 790m	131
FIGURA 76 – RESULTADOS PARA ELEVAÇÃO DA COTA MÁXIMA (EM METROS) EL. 810m.....	132
FIGURA 77 – COMPARAÇÃO INUNDAÇÃO EL. 810m	134
FIGURA 78 – COMPARAÇÃO DO CENÁRIO BR35 E BR40s PARA EL. 810m	136
FIGURA 79 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA PROFUNDIDADE (EM METROS) PARA EL. 810m	136
FIGURA 80 – DETALHE COMPARATIVO DA PROFUNDIDADE PARA EL. 790m ..	138
FIGURA 81 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA VELOCIDADE MÁXIMA (m/s) PARA EL. 810m.....	138
FIGURA 82 – DETALHE COMPARATIVO VELOCIDADES PARA EL. 810m	140
FIGURA 83 – RESULTADOS NUMÉRICOS DO RISCO HIDRODINÂMICO (m ² /s) PARA EL. 810m	140
FIGURA 84 – DETALHE COMPARATIVO PARA O RISCO HIDRODINÂMICO NA EL. 810m.....	142
FIGURA 85 – RESULTADOS PARA TEMPO PARA NÍVEL MÁXIMO (EM HORAS) PARA EL. 810m	142

FIGURA 86 – DETALHE DO TEMPO COTA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO NA EL. 810m	144
FIGURA 87 – RESULTADOS PARA O TEMPO CHEGADA DA ONDA (HORAS) PARA EL. 810m	144
FIGURA 88 – DETALHE COMPARATIVO PARA TEMPO DE CHEGADA DA ONDA NA EL. 810m.....	146
FIGURA 89 – DETALHE COMPARATIVO DO BR40f E BR40s PARA TEMPO DE CHEGADA DA ONDA NA EL. 810m.....	146
FIGURA 90 – RESULTADOS PARA ELEVAÇÃO DA COTA MÁXIMA (EM METROS) EL. 840m.....	147
FIGURA 91 – COMPARAÇÃO INUNDAÇÃO EL. 840m	149
FIGURA 92 – COMPARAÇÃO DO CENÁRIO CV35 COM BR35, BR40f E BR40s PARA EL. 810m	150
FIGURA 93 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA PROFUNDIDADE (EM METROS) PARA EL. 840m	151
FIGURA 94 – DIFERENÇAS DOS RESULTADOS PARA PROFUNDIDADE.....	153
FIGURA 95 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA VELOCIDADE MÁXIMA (m/s) PARA EL. 840m.....	154
FIGURA 96 – DETALHE COMPARATIVO VELOCIDADES PARA EL. 840m	156
FIGURA 97 – RESULTADOS NUMÉRICOS DO RISCO HIDRODINÂMICO (m ² /s) PARA EL. 840m	156
FIGURA 98 – DETALHE COMPARATIVO PARA O RISCO HIDRODINÂMICO NA EL. 840m.....	158
FIGURA 99 – RESULTADOS PARA TEMPO PARA NÍVEL MÁXIMO (EM HORAS) PARA EL. 840m	159
FIGURA 100 – DETALHE DO TEMPO PARA A COTA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO SEJA ATINGIDA NA EL. 840m	161
FIGURA 101 – RESULTADOS PARA O TEMPO CHEGADA DA ONDA (HORAS) PARA EL. 840m	162

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIO PARA C_v DE 35%	
.....	83
GRÁFICO 2 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA ENSAIO COM C_v DE 40%	
.....	86

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITO	34
QUADRO 2 – RESUMO DE CARACTERÍSTICAS DOS FENÔMENOS DE LIQUEFAÇÃO	44
QUADRO 3 – TERMO DE RESISTÊNCIA S_f PARA CANAIS RETANGULARES	64
QUADRO 4 – TIPO DE ESCOAMENTO CONFORME A CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA	65
QUADRO 5 – FORMULAÇÕES E RESPECTIVOS PARÂMETROS DE ENTRADA	69
QUADRO 6 – RESULTADOS PARA O LIMITE DE LIQUIDEZ – AMOSTRA 1	73
QUADRO 7 – RESULTADOS PARA O LIMITE DE LIQUIDEZ – AMOSTRA 2	74
QUADRO 8 – QUANTIDADE DE ÁGUA PARA CADA ENSAIO	79
QUADRO 9 – RESULTADOS REOMÉTRICOS OBTIDOS PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 35%	81
QUADRO 10 – RESULTADOS REOMÉTRICOS OBTIDOS PARA O ENSAIO 2 COM C_v DE 35%	82
QUADRO 11 – RESULTADOS REOMÉTRICOS OBTIDOS PARA O ENSAIO 3 COM C_v DE 35%	82
QUADRO 12 – DADOS DO REÔMETRO PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 37,5% ..	84
QUADRO 13 – DADOS DO REÔMETRO PARA O ENSAIO 2 COM C_v DE 37,5% ..	84
QUADRO 14 – RESULTADOS REOMÉTRICOS OBTIDOS PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 40%	85
QUADRO 15 – RESULTADOS REOMÉTRICOS OBTIDOS PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 40%	86
QUADRO 16 – EXEMPLO PARA DIVISÃO DOS DADOS EM REGIÕES	87
QUADRO 17 – DADOS TRATADOS PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 35%	88
QUADRO 18 – DADOS TRATADOS PARA O ENSAIO 3 COM C_v DE 35%	88
QUADRO 19 – DADOS TRATADOS PARA O ENSAIO 2 COM C_v DE 37,5%	89
QUADRO 20 – DADOS TRATADOS PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 40%	90
QUADRO 21 – DADOS TRATADOS PARA O ENSAIO 2 COM C_v DE 40%	90
QUADRO 22 – COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS NA AMOSTRA COM C_v DE 35% ..	91
QUADRO 23 – COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS NA AMOSTRA COM C_v DE 40% ..	91
QUADRO 24 – VALORES MÉDIOS PARA A CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE 35%	92

QUADRO 25 – VALORES MÉDIOS PARA A CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE 40%.....	93
QUADRO 26 – VALORES MÉDIOS PARA A CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE 35%.....	94
QUADRO 27 – VALORES MÉDIOS PARA A CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE 40%.....	95
QUADRO 28 – COMPARAÇÃO DAS TENSÕES INICIAS E MODELOS DE ESCOAMENTO PARA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE 40% NA AMOSTRA DE BRUMADINHO	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – NÍVEL DE PERIGO PARA SERES HUMANOS	36
TABELA 2 – NÍVEL DE PERIGO PARA EDIFICAÇÕES	37
TABELA 3 – COEFICIENTES HORIZONTAIS DE SISMO	45
TABELA 4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DENSIDADE DOS GRÃOS	71
TABELA 5 – PERCENTUAL DE CADA FRAÇÃO DO SOLO PARA A AMOSTRA COLETADA.....	76
TABELA 6 – RESUMO DOS VALORES UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	110

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	- Agência Nacional de Mineração
CEPPA	- Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos
CIGB	- Comissão Internacional de Grandes Barragens
CNRH	- Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CSL	- <i>Critical State Line</i>
DNPM	- Departamento Nacional de Mineração
FLS	- Fluid Liquefaction Surface
IP	- Índice de Plasticidade
Lab E Sed	- Laboratório de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar
LAME	- Laboratório de Materiais e Estruturas
LL	- Limite de Liquidez
LP	- Limite de Plasticidade
MG	- Estado de Minas Gerais
NBR	- Norma técnica
PAE	- Plano de Ação de Emergência
PNSB	- Política Nacional de Segurança de Barragens
RPM	- Rotações por minutos
SSL	- <i>Steady State Line</i>
UFPR	- Universidade Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - área (L^2)
- g - aceleração da gravidade ($L.T^{-2}$)
- s - altura do abatimento do cone ou cilindro, denominado slump (L)
- y - altura do escoamento (L)
- H_t - altura do fluxo de lama (L)
- H_c - altura do fluxo de lama na frente de avanço (L)
- H - altura do recipiente (L)
- H_0 - altura inicial do aterro (barragem) (L)
- ϕ - ângulo de atrito (do material sólido ou solo)
- ϕ' - ângulo de atrito efetivo (do material sólido ou solo)
- ϕ'_L - ângulo de atrito efetivo da superfície de colapso
- n - coeficiente de Manning ($L^{-1/3}.T$)
- C_w - concentração de sólidos por peso
- C_v - concentração volumétrica
- M - declividade da *Critical State Line* (CSL)
- M_L - declividade da Superfície de Colapso (FLS)
- S_0 - declividade do leito do canal ($L.L^{-1}$)
- G - densidade dos grãos
- dx - derivada no espaço
- dt - derivada no tempo
- ∂x - derivada parcial no espaço
- ∂t - derivada parcial no tempo
- ∂Q - derivada parcial da vazão
- ∂A - derivada parcial da área
- ∂u - derivada parcial da velocidade
- ∂y - derivada parcial da altura de escoamento
- L - distância do fluxo de lama (L)
- L_e - distância do início do fluxo de lama até o pé da barragem (L)
- L_t - distância do espalhamento lama (L)
- τ_c - forças coesivas ($M.L.T^{-2}.L^{-2}$)
- F_g - força gravitacional atuante no escoamento em canal ($M.L.T^{-2}$)

F_τ - forças viscosas no escoamento em canal (M.L.T⁻²)

F_p - força de pressão no escoamento em canal (M.L.T⁻²)

F_l - força lateral atuante no escoamento em canal (M.L.T⁻²)

ε - função do tamanho do grão, concentração de sólidos, densidade da partícula e ângulo de atrito interno.

$\frac{\partial u}{\partial y}$ - gradiente de velocidade (T⁻¹)

α - inclinação do fluxo de lama

β - inclinação do terreno (fluxo de material)

θ - inclinação do terreno (fluxo em canal)

ρ - massa específica do material (M.L.⁻³)

p' - média das tensões efetivas (M.L.T⁻².L⁻²)

s' - medida do slump adimensional

N_0 - número retirado da carta de estabilidade

S_f - perdas por atrito (adimensional)

γ_w - peso específico da água (M.L.T⁻².L⁻³)

γ_s - peso específico dos sólidos (M.L.T⁻².L⁻³)

γ - peso específico do material (M.L.T⁻².L⁻³)

γ_{sat} - peso específico do material saturado (M.L.T⁻².L⁻³)

γ_{sub} - peso específico do material submerso (M.L.T⁻².L⁻³)

P_w - peso da água (M)

P_s - peso do material sólido (M)

P - peso do líquido no canal (M)

p - pressão (M.L.T⁻².L⁻²)

h - profundidade do escoamento (L)

S_u - resistência não drenada (M.L.T⁻².L⁻²)

$Su_{(LIQ)}$ - resistência não drenada liquefeita (M.L.T⁻².L⁻²)

Σ - somatório de números

τ - tensão cisalhante ou tensão de cisalhamento (M.L.T⁻².L⁻²)

τ_y - tensão crítica ou tensão limite de escoamento ou tensão de escoamento (MLT⁻².L⁻²)

$\tau_{y'}$ - tensão de escoamento adimensional (M.L.T⁻².L⁻²)

τ - tensão de cisalhamento (M.L.T⁻².L⁻²)

q - tensão desviatória e vazão adicionada ou removida do escoamento e vazão específica ($M.L.T^{-2}.L^{-2}$) e ($L^3.T^{-1}$) e ($L^3.T^{-1}.L^{-1}$)

τ_d - tensão dispersiva ($M.L.T^{-2}.L^{-2}$)

τ_f - tensão friccional tipo Coulomb ($M.L.T^{-2}.L^{-2}$)

σ - tensão normal ($M.L.T^{-2}.L^{-2}$)

σ_1 - tensão principal maior ($M.L.T^{-2}.L^{-2}$)

σ_3 - tensão principal menor ($M.L.T^{-2}.L^{-2}$)

τ_t - tensão turbulenta ($M.L.T^{-2}.L^{-2}$)

τ_μ - tensão viscosa ($M.L.T^{-2}.L^{-2}$)

Q - vazão ($L^3.T^{-1}$)

v - velocidade ($L.T^{-1}$)

ν - viscosidade cinemática ($L^2.T^{-1}$)

μ - viscosidade dinâmica ($M.L.T^{-2}.L^{-2}.T$)

μ_n - viscosidade dinâmica para fluido pseudoplástico ou dilatante ($M.L.T^{-2}.L^{-2}.T$)

μ_B - viscosidade plástica ($M.L.T^{-2}.L^{-2}.T$)

V_w - volume de água (L^3)

V_f - volume do fluxo de lama por unidade de largura ($L^3.L^{-1}$)

V_s - volume de sólidos (L^3)

V_T - volume total (L^3)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
1.3 METODOLOGIA.....	21
2 REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1 BARRAGENS.....	23
2.2 REJEITOS DE MINERAÇÃO	23
2.3 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS.....	26
2.4 DEPOSIÇÃO	29
2.5 MÉTODOS CONSTRUTIVOS.....	30
2.6 POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (PNSB).....	33
2.7 PLANO DE AÇÕES EMERGENCIAIS PARA BARRAGEM DE MINERAÇÃO....	35
2.8 RUPTURA DE BARRAGENS.....	37
2.9 LIQUEFAÇÃO	38
2.9.1 Análise pseudoestática.....	45
2.9.2 Suscetibilidade dos materiais à liquefação.....	48
2.10 MODELOS DE FLUXO.....	50
2.10.1 Modelo de Equilíbrio das Forças Simplificado	50
2.10.2 Modelos de fluxo de fluido.....	53
2.10.2.1 Reometria	56
2.11 EQUAÇÕES DE ÁGUAS RASAS PARA FLUIDO NEWTONIANO E NÃO NEWTONIANO.....	58
3 MATERIAIS E MÉTODOS	70
3.1 CARACATRIZAÇÃO DO SOLO	70
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO FLUIDO NÃO NEWTONIANO.....	77
3.2.1 Ensaio reométrico	79
3.2.1.1 Dados tratados	87
3.3 DESCRIÇÃO DA BARRAGEM ANALISADA.....	96
3.4 FERRAMENTA COMPUTACIONAL UTILIZADA	99
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	101

4.1 BARRAMENTO COM EL. 760M	110
4.2 BARRAMENTO COM EL. 790M	120
4.3 BARRAMENTO COM EL. 810M	132
4.4 BARRAMENTO COM EL. 840M	147
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	165
REFERÊNCIAS.....	168
APÊNDICE 1 – ENSAIO LIMITE DE LIQUIDEZ (AMOSTRA 1)	177
APÊNDICE 2 – ENSAIO LIMITE DE LIQUIDEZ (ENSAIO 2).....	178
APÊNDICE 3 – ENSAIO LIMITE DE PLASTICIDADE (ENSAIO 1)	179
APÊNDICE 4 – ENSAIO LIMITE DE PLASTICIDADE (ENSAIO 2)	180
ANEXO 1 – CLASSIFICAÇÃO PARA BARRAGENS DE MINERAÇÃO (DNPM) .	181

1 INTRODUÇÃO

Em anos recentes, o Brasil presenciou dois desastres de grande porte envolvendo barragens de rejeitos, o primeiro foi em 2015 em Mariana/MG e o segundo em Brumadinho/MG no ano de 2019.

No ano de 2015, no município de Mariana/MG, ocorreu a ruptura da barragem de Fundão, vitimando 19 pessoas (18 identificadas e 1 desaparecida). A partir daquele momento, a legislação de nº 12.334/2010, sobre segurança desse tipo de estrutura, começou a ser realmente cobrada dos empreendedores. Até o acidente, os esforços realizados eram pequenos ou aquém do necessário, tanto por parte de empreendedores quanto por parte de órgãos públicos.

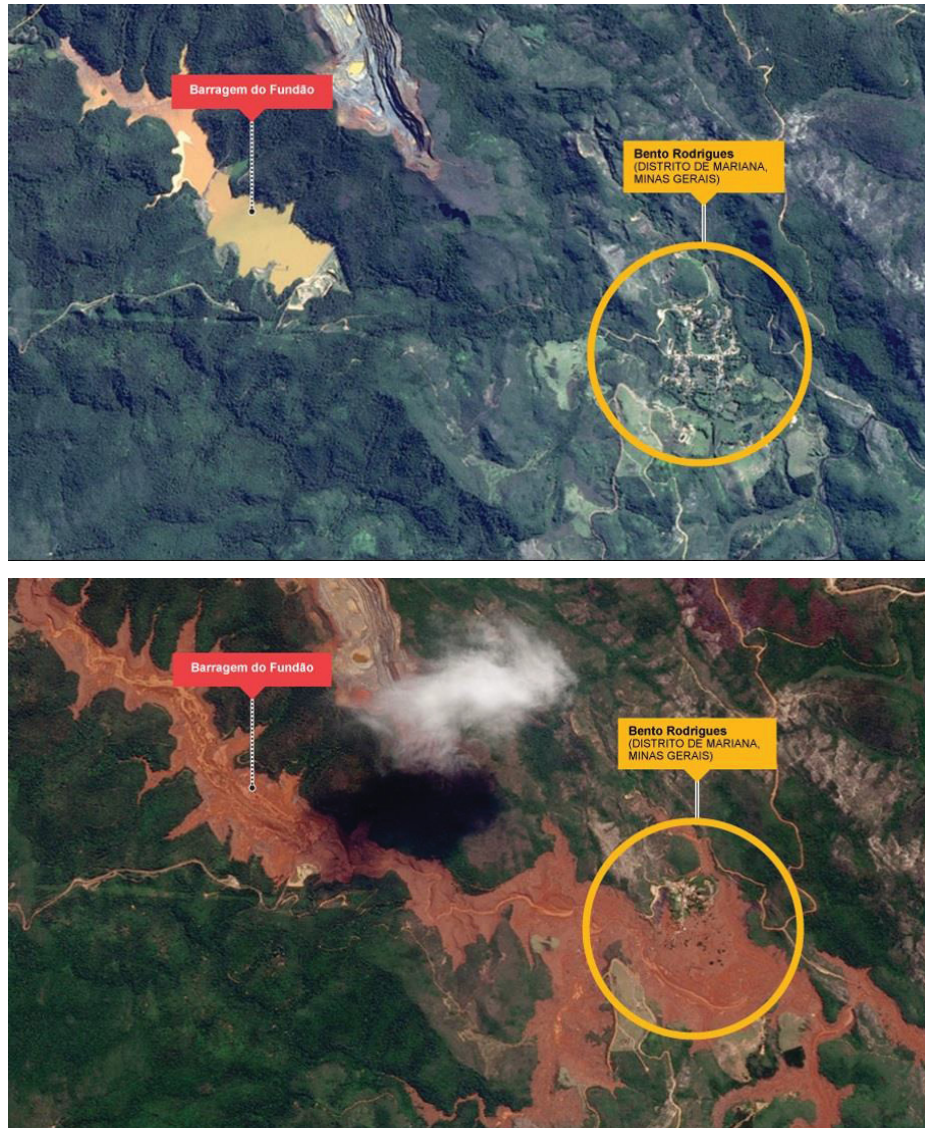
Sob propriedade da Samarco Mineração S.A. (empreendimento da Vale S.A. e BHP Billiton), a barragem de 130 metros de altura possuía dois tipos de rejeitos dispostos separadamente. Machado (2017) descreve que o rejeito arenoso era proveniente da flotação convencional e possuía alta permeabilidade, o que gerava condições satisfatórias de resistência em condições drenadas. O rejeito fino (lama), oriundo da deslamagem e do processo de recuperação de minério de ferro, era depositado a uma distância de 200 metros (conhecida como praia) do talude da barragem, justamente separado pelo rejeito arenoso.

A capacidade final do reservatório de lama seria aproximadamente 79 Mm³ e para o rejeito arenoso 32 Mm³, porém o volume desprendido e propagado foi reportado em três relatórios técnicos, conforme Machado (2017). Nestes três relatórios, os valores do percentual liberado variam conforme os autores, Morgenstern et al. (2016) citam que 32 Mm³ de rejeitos foram liberados do reservatório, representando 61% do volume total. Já o relatório da Geomecânica & Norwegian Geotechnical Institute (2016), estima cerca de 32 Mm³ de rejeitos e água, isso representa 58% do total de 55 Mm³ de materiais contidos na barragem. O último relatório da Golder Associates (2016) menciona que o volume seria de 32 Mm³ de rejeitos e água. Apesar de diferentes, todos convergem para um valor de 32 Mm³ desprendido, porém diferem no quanto isso seria percentualmente no volume total.

A ruptura afetou 680 km de corpos hídricos da bacia hidrográfica, no qual os maiores impactos foram nos primeiros 80 km. Cerca de 2,2 mil hectares foram inundados, impedindo propriedades rurais de produzir. A pluma também afetou a

captação direta de água no rio Doce, comprometendo o abastecimento doméstico. A FIGURA 1 apresenta o distrito Bento Rodrigues antes e depois da ruptura.

FIGURA 1 – INUNDAÇÃO RUPTURA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA/MG



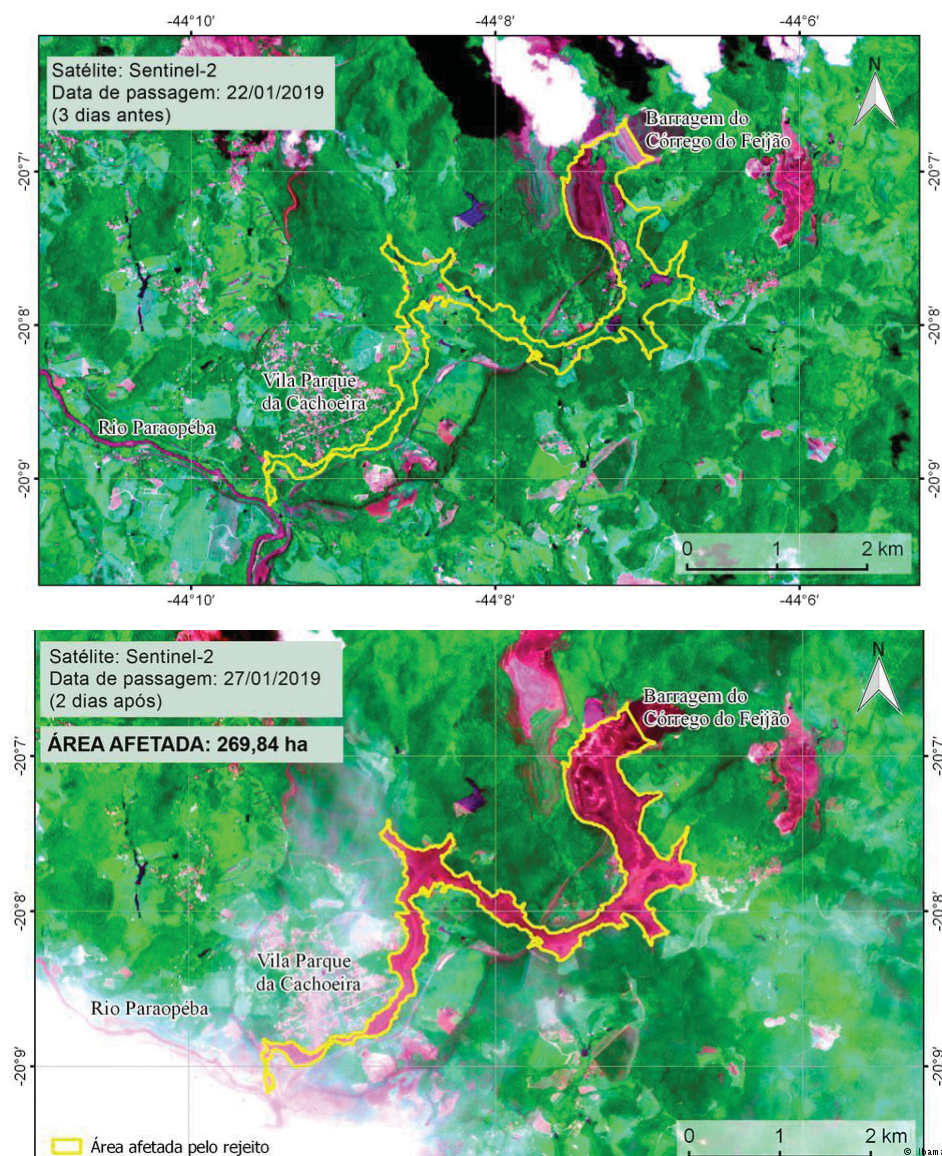
FONTE: <http://netdia.blogspot.com/2015/11/estouro-da-barragem-do-fundao-em.html>

Em Brumadinho/MG, a Barragem B-I do Córrego do Feijão (também pertencente à Vale S.A.), era para acumulação de rejeitos, porém essa já estava sendo descomissionada. Ou seja, já não recebia mais material e estava sendo incorporada ao meio ambiente. Segundo a própria mineradora Vale, esse barramento possuía 86 metros de altura, 720 m de comprimento de crista, o volume do reservatório era de 11,7 milhões de m³ em uma área de 249,5 mil m². Sua ruptura ocasionou 215 mortes confirmadas até o dia 25 de março de 2019, sendo que esse

número pode crescer. Após o rompimento, a Vale divulgou que 305 pessoas estavam sem contato logo após o acidente.

Além das perdas de vidas humanas, o Ibama estima que pelo menos 269,84 hectares foram destruídos (FIGURA 2), sendo que 133,27 hectares eram de vegetação nativa de Mata Atlântica e 70,65 hectares de Áreas de Preservação Permanente (APP) ao longo do curso d'água.

FIGURA 2 – INUNDAÇÃO RUPTURA BARRAGEM B-I EM BRUMADINHO/MG

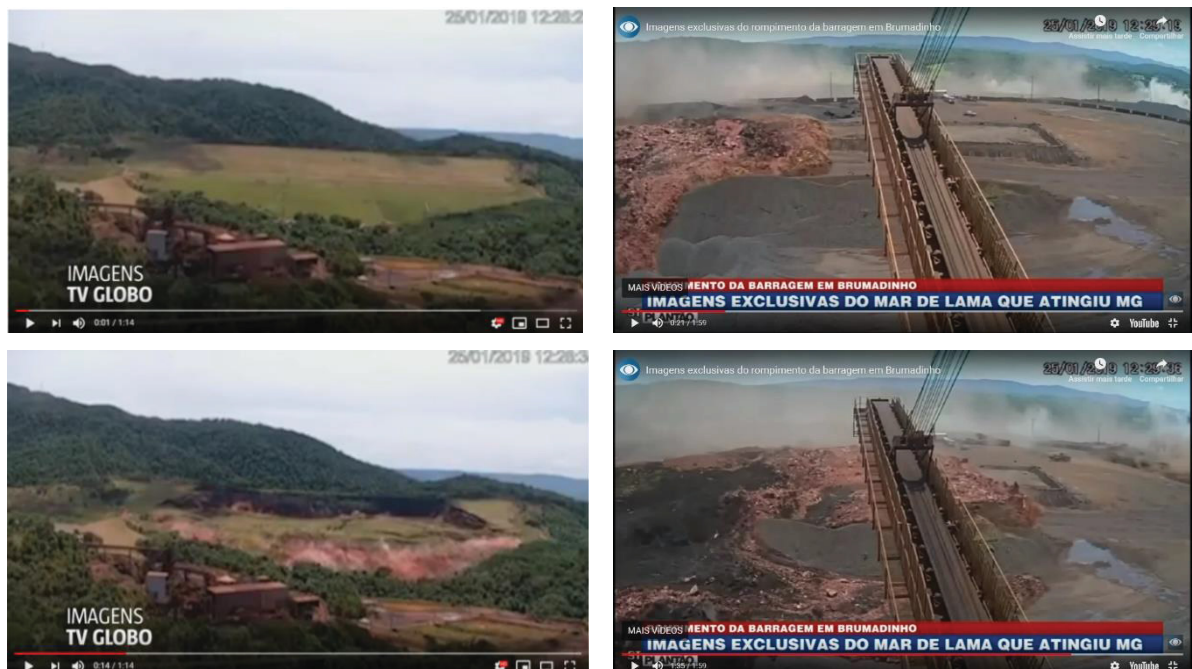


FONTE: ASCOM/Ibama (2019)

Após o acidente de Mariana/MG, muitas providências foram tomadas em termos de fiscalização das barragens, como por exemplo a adoção de câmeras de

vigilância para o monitoramento do talude de jusante nas barragens de rejeito. Por conta dessas decisões, quando ocorreu o desastre de Brumadinho/MG em janeiro de 2019, observaram-se alguns detalhes importantes que auxiliam no estudo desta dissertação. Por exemplo, a velocidade que a barragem se rompe e, em imagens da esteira para disposição de material, que o comportamento do fluido parecia possuir um efeito viscoso, não se assemelhando à água (FIGURA 3). É importante ressaltar que no caso de Brumadinho a velocidade de ruptura e modo foram atípicos comparados com outros casos de ruptura envolvendo barragens de rejeito.

FIGURA 3 – IMAGENS DA RUPTURA DA BARRAGEM B-I EM BRUMADINHO/MG



FONTE: (a) TV Globo; (b) TV Band (2019)

LEGENDA: (A) Ruptura do barramento (B) Escoamento do material liberado

Para ambas situações de ruptura (Brumadinho e Mariana), como o material despejado consiste em uma mistura de material sólido, seu comportamento mecânico é complexo, diferente daquele encontrado na água pura e no rejeito seco.

Saber como abordar esse comportamento mecânico é importante, pois uma das partes integrantes do Plano Nacional de Segurança de Barragens é o Plano de Ação de Emergência (PAE). Neste deve ser realizado estudos de ruptura da barragem para analisar e verificar o seu mapa de inundação. Dessa maneira é possível tomar as ações necessárias para mitigar danos em uma eventual falha.

Nesse contexto, saber o tipo de material que está sendo liberado é essencial para identificar se os dados de entradas estão gerando resultados compatíveis com a realidade. No entanto, ainda não existe um consenso sobre comportamento do rejeito, ainda mais quando está sendo liberado. Nessa questão cabe maiores investigações.

Existem duas abordagens possíveis, uma considerando o material com propriedades geotécnicas, ou seja, teorias de equilíbrio limite da mecânica dos solos e outra como um fluido, estas tratadas em capítulos mais adiante. Ressalta-se que as teorias por trás de cada uma diferem entre si. Por esse motivo, espera-se como hipótese que o material se comporte como um fluido, desde de que os valores do material sejam ajustados corretamente para essa teoria.

1.1 JUSTIFICATIVA

Para muitos dos estudos de ruptura realizados em PAE, existem *softwares*, tanto comerciais como livres, no qual essas verificações são feitas. Entretanto, em muitos, o fluido utilizado é a água, com isso a equação empregue é a de Saint-Venant (águas rasas), a qual é uma simplificação da equação de Navier-Stokes. O comportamento do rejeito não se assemelha ao da água, em virtude de não ser um fluido Newtoniano, mas se assemelha à um fluido que possui propriedades viscosas, ou seja, um fluido não newtoniano.

Portanto, modelar a ruptura de uma barragem utilizando a água como material não corresponde ao fenômeno na realidade, no caso de rejeitos. Apesar da água ser a favor da segurança em termos de extensão de propagação longitudinal, o rejeito desloca-se mais lateralmente. Por essa razão, entender o comportamento do rejeito a partir da sua fase semilíquido e líquido é importante para constituir modelos mais realistas. Com o ajuste de alguns parâmetros, é possível reproduzir esse fenômeno.

1.2 OBJETIVOS

Como este tema é recentemente tratado no Brasil, em virtude das rupturas de barragens de rejeito nos últimos anos, existe necessidade de:

- 1) calibrar os parâmetros de entrada
- 2) entender melhor o processo de propagação desse tipo de escoamento de rejeitos.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a propagação do escoamento gerado pela ruptura de barragem hipotética utilizando a modelagem de fluido não-Newtoniano e comparar com uma simulação utilizando água.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos podemos citar:

- Definir as propriedades do material do fluido não newtoniano;
- Simular a ruptura hipotética de uma barragem e verificar o seu escoamento para diferentes condições do material;
- Destacar as diferenças entre as modelagens com maior quantidade de sólidos (ou menor quantidade de água).

Além dos objetivos propostos, este estudo também analisa se os ensaios utilizados, propostos em literatura, são de fato os ideais para avaliar o comportamento do material. Outra questão que pode ser discutida é a efetividade dos ensaios, visto que eles também possuem limitações e restrições, principalmente em razão da homogeneidade da amostra. Por último também é passível de se avaliar diferentes modelos de propagação de onda, atribuindo ou simplificando as equações utilizadas.

1.3 METODOLOGIA

Este estudo inicia discutindo aspectos básicos de barragens de rejeito, a fim de elencar suas propriedades e métodos construtivos para diferenciar em relação a uma barragem com um reservatório de armazenamento de água. Além disso, é discutida a avaliação da segurança desse tipo de estrutura dentro da legislação nacional, conforme a agência reguladora responsável (DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, atualmente ANM – Agência Nacional de Mineração).

Após essa seção, são discutidos os modelos de ruptura de barragens, seus métodos, tipos e considerações, em especial a liquefação que foi a causa que originou os desastres recentes.

Em seguida, o estudo elenca a maneira de se avaliar o escoamento de fluido não newtoniano em canais, por meio dos modelos de fluxo e relacionando quais os

parâmetros utilizados, quais propriedades são importantes e o que se deve analisar nos ensaios de reometria. São elencadas as maneiras corretas para obter as propriedades corretas, conforme a bibliografia existente.

No capítulo 3 são discutidos os valores obtidos dos ensaios realizados, tanto para a amostra de solo, como a do fluido não newtoniano obtido pela adição de água. Na seção seguinte são apresentados os resultados obtidos para as simulações realizadas, discutindo-se suas diferenças e valores obtidos. As simulações foram feitas no software *RiverFlow2D* com uma condição de contorno de jusante a 50 km da barragem. Esta condição apresentava a declividade média do canal no trecho, a malha utilizada foi uma triangular de 30 m. O termo de resistência foi o coeficiente de Manning para a água, no caso de $0,035 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ e para o fluido não newtoniano as propriedades reológicas a serem inseridas nos termos de resistência discutido no item 2.10. Por último são apresentadas as conclusões dos estudos e recomendações para futuros trabalhos.

Nos anexos são apresentados os itens avaliados pela ANM para categoria de risco e dano potencial associado que compõem a classificação do barramento segundo a lei nº 12.334/2010. Nos apêndices são apresentados os resultados dos ensaios realizados para a caracterização do material.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Antes do desenvolvimento do trabalho, faz-se necessário entender e explicar conceitos que irão ser aplicados no estudo. Dessa forma convém abordar itens como barragens, os rejeitos de mineração, sua disposição, os métodos construtivos para essa estrutura, a política nacional de segurança de barragens dentro do qual se insere estudos de ruptura hipotético e por fim, modelos para avaliar a propagação do rejeito.

2.1 BARRAGENS

Segundo a Comissão Internacional de Grandes Barragens – CIGB (2008), barragens “são definidas como barreiras ou estruturas que cruzam córregos, rios ou canais para confinar e assim controlar o fluxo da água” ou rejeitos e de acordo com Costa (2012, p. 22) “sua definição constitui a primeira condicionante no planejamento de uma barragem”. Bates (2003) afirma que as barragens podem represar água, sólidos em suspensão (incluindo lama) ou rejeitos sólidos livres de água. O rejeito é decorrente principalmente da atividade de mineração, o que é mais detalhado a seguir.

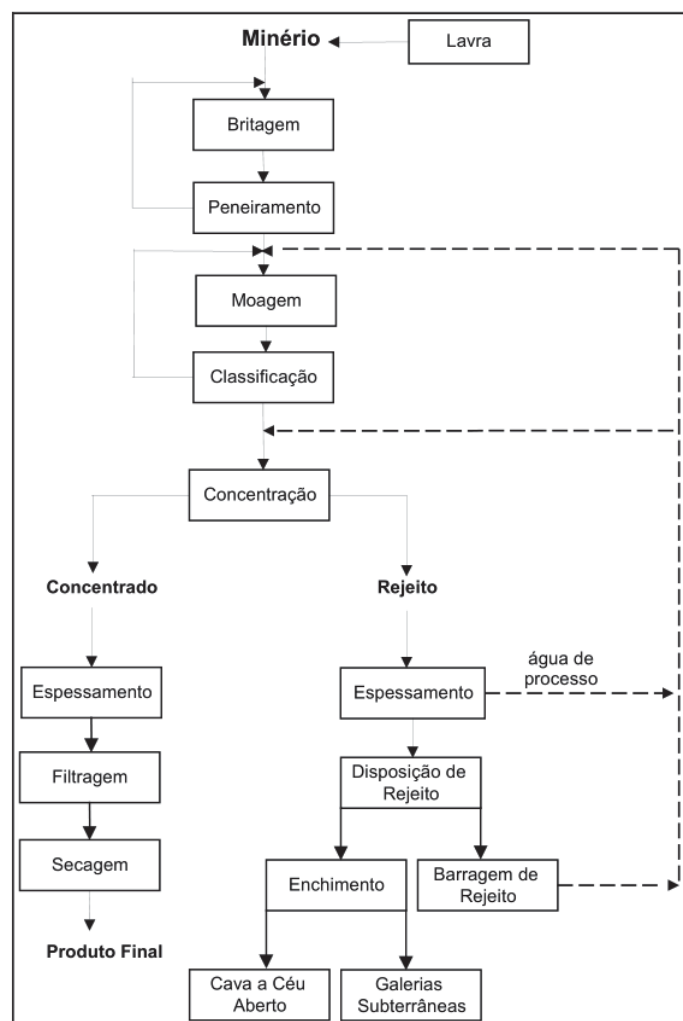
2.2 REJEITOS DE MINERAÇÃO

De acordo com Boscov (2007), minério é uma rocha cujo mineral ou conjunto de minerais pode ser extraído com valor econômico. O conjunto de processos, atividades e indústrias que permitem obter esses minerais é chamado de mineração. Para esse material ser obtido são realizadas duas etapas, a lavra e o beneficiamento. A autora denomina lavra como a retirada do minério da jazida, enquanto o beneficiamento é o “tratamento para preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios, visando extrair o mineral de interesse econômico”.

Nos dois casos são gerados resíduos, cujos principais são os estéreis e os rejeitos. O primeiro é decorrente da extração ou lavra da mina, ou seja, são os materiais (sem valor econômico nenhum) que foram escavados para atingir o minério. Já os rejeitos são oriundos do beneficiamento. Este tem por objetivo regularizar os tamanhos dos fragmentos, retirar minerais sem valor econômico associados e aumentar a qualidade pureza ou teor do produto final.

O tipo de procedimento depende do tipo e qualidade do minério. Segundo Lazarim (2015), para obtenção do minério de ferro, um dos processos possíveis é submeter a etapas sucessivas de peneiramento, britagem, moagem, deslamagem (espessamento) e flotação em colunas, o que resulta em ferro concentrado, eliminando impurezas. Luz et al. (2010) apresentam um fluxograma ilustrando um topo de processo de tratamento do minério (FIGURA 4), ressalta-se que esta é uma maneira.

FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DE UM TIPO DE PROCESSO DE TRATAMENTO DO MINÉRIO



FONTE: Luz et al. (2010)

Os rejeitos são classificados em dois grupos, após o beneficiamento (ESPÓSITO, 2000 apud SOUZA JUNIOR, 2018):

- Rejeitos de granulometria fina (diâmetro partícula < 0,074 mm)
- Rejeitos de granulometria grossa (diâmetro partícula > 0,074 mm)

Conforme Lazarim (2015 apud SOUZA JUNIOR, 2018), rejeitos de caráter granular (areias finas a médias) possuem alta permeabilidade, baixa compressibilidade e alta resistência ao cisalhamento. Rejeitos com consistência de lama (siltes e argilas) tendem a possuir difícil sedimentação, alta plasticidade e compressibilidade.

Lazarim (2015) ainda destaca que o descarte do rejeito pode ser feito na forma sólida (pasta ou granel) como ilustrado na FIGURA 5, ou líquida (polpa). Para a primeira situação o transporte é feito através de caminhões e/ou correias transportadoras e para a polpa, por meio de tubulações.

FIGURA 5 – REJEITO EM PASTA



FONTE: Boger (2013)

De acordo com Chammas (1989 apud ARAÚJO, 2006), a polpa apresenta três tipos de comportamento:

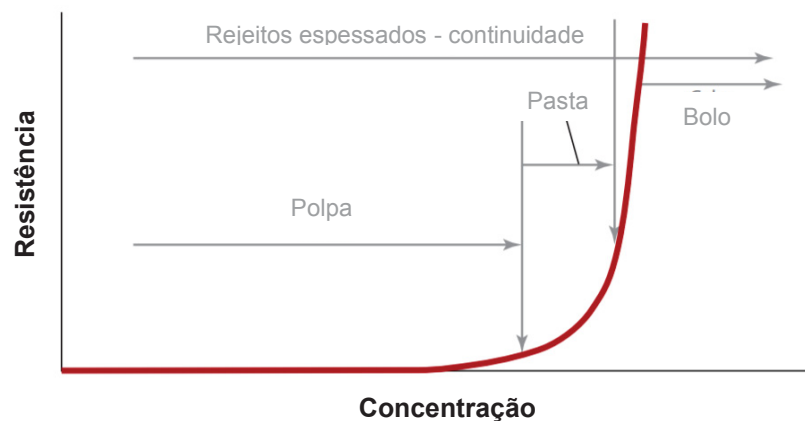
- comportamento de líquido sobrenadante, ocorrendo a floculação das partículas de menor tamanho;
- rejeito em processo de sedimentação, apresentando comportamento semi-líquido e semi-viscoso;
- rejeito em processo de adensamento, comportando-se como um solo.

Portanto, a polpa, conforme seu estado, pode apresentar três tipos de comportamentos diferentes, o que eventualmente altera o tipo de análise que deve ser feita com o material. Como o trabalho é sobre a ruptura de uma barragem de

rejeitos como fluido não newtoniano, os focos são os estados líquido e semilíquidos segundo a denominação de Chammas (1989).

Boger (2013) divide em três classes – polpa, pasta e bolo (*slurry*, *paste* e *cake*) – que variam conforme a tensão limite de escoamento. A FIGURA 6 apresenta a relação entre a resistência dos rejeitos ao escoamento com a concentração de sólidos (consistência), na qual conclui-se que as propriedades reológicas variam conforme a concentração volumétrica (teor de sólidos). A concentração volumétrica é relação entre o volume de sólidos e o volume total e será mais abordada no item 3.2

FIGURA 6 – CURVA DE RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO VS. CONCENTRAÇÃO MATERIAL



FONTE: Adaptado de Boger (2013)

2.3 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

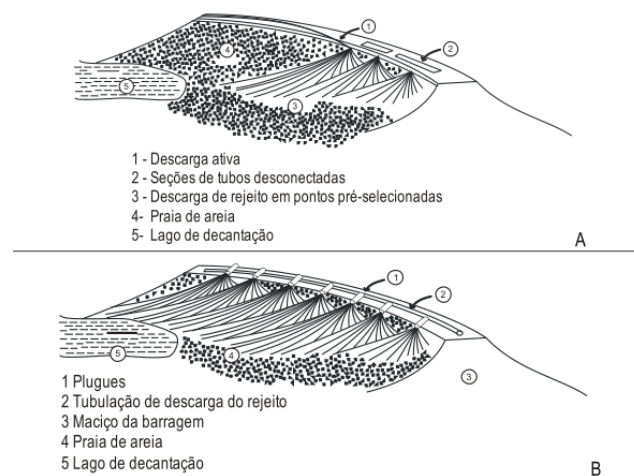
O transporte da polpa é feito por gravidade para se ter um custo operacional relativamente baixo mesmo em grandes distâncias. Esse transporte é realizado por meio de calhas abertas ou valetas, ou mais comumente por tubulações (com ou sem bombeamento). Segundo Luz et al. (2010), este último é determinado pela diferença de cota entre a usina de beneficiamento e a área de disposição e também, pelo comprimento da tubulação e suas perdas de carga.

Souza Junior (2018) afirma que existem três métodos bem difundidos para a disposição de rejeitos, são eles:

- Descarga em um único ponto;
- *Spigoting*; e
- Ciclonagem.

O *spigoting* consiste em descarregar o rejeito por meio de tubulação, no qual existem múltiplos pontos de saída em intervalos regulares, conforme o *U.S. Environmental Protection Agency* (1994). De acordo com Luz et al. (2010) para o caso A da FIGURA 7, as tubulações são desconectadas e realocadas para possibilitar a formação sequencial dos depósitos. Já no caso B, os plugues têm a função de fazer isso simultaneamente de maneira contínua, como também mostra a FIGURA 8.

FIGURA 7 – DISPOSIÇÃO DE REJEITOS



FONTE: Vick (1983) apud Luz et al. (2010)

Pode-se ainda controlar o lançamento dos rejeitos por válvulas individuais em cada plugue. Segundo Luz et al. (2010 apud SOUZA JUNIOR, 2018), os *spigots* ficam posicionados de 15 a 45 metros, o que possibilita a formação de declives suaves nas praias através da segregação hidráulica (FIGURA 8).

FIGURA 8 – UTILIZAÇÃO DE SPIGOTS

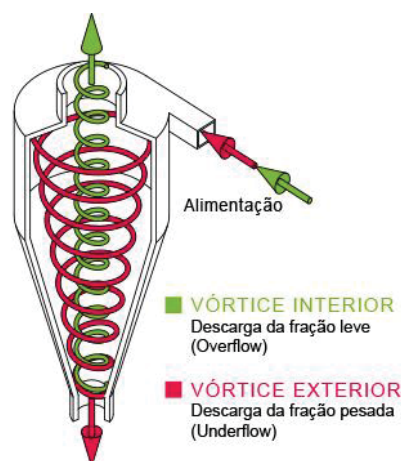


FONTE: Teixeira (2017)

Para auxiliar na separação da fração fina da grosseira, é utilizada a ciclonagem. Este método é muito usado principalmente quando há o alteamento da barragem pela linha de montante e linha de centro (discutidos em capítulo seguinte), de acordo com Fell et al. (2015).

Para esse método, se usa hidrociclones para a classificação da granulometria dos rejeitos. Segundo o *U.S. Environmental Protection Agency* (1994), esses são dispositivos mecânicos que separam as frações finas das grosseiras da polpa através do uso de forças centrífugas. Conforme a polpa se movimenta em trajetória helicoidal, as partículas grossas se direcionam para as paredes e as mais finas para o centro. As partículas finas e a maior parte da água ascendem (*overflow*) e as frações grosseiras descendem (*underflow*) pelo equipamento, segundo Araújo (2006) e ilustrada pela FIGURA 9.

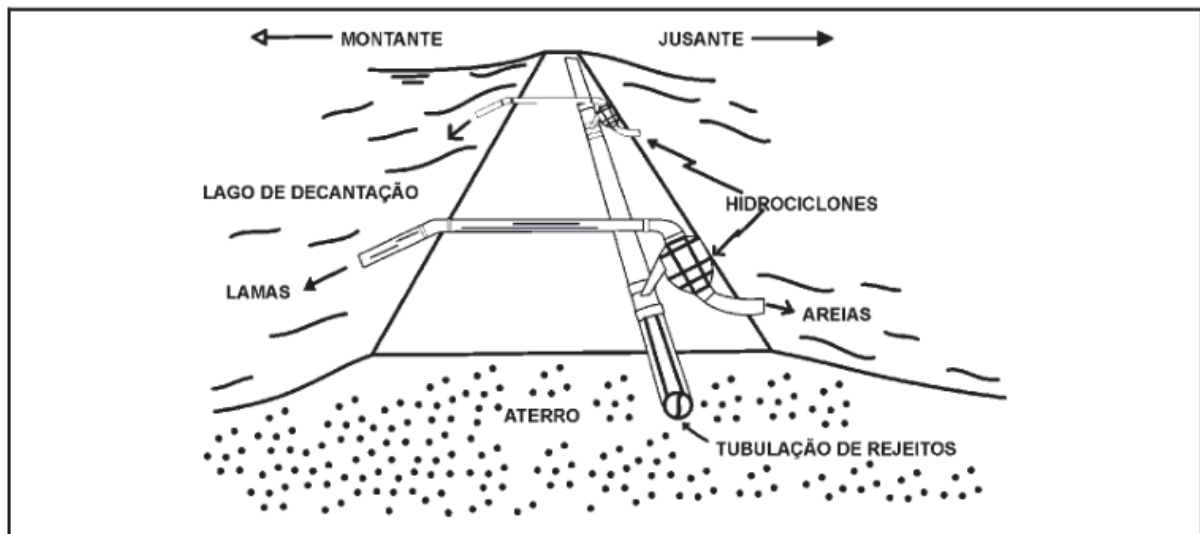
FIGURA 9 – FUNCIONAMENTO DO HIDROCICLONE



FONTE: AKW equipamentos e processos (2017)

Segundo Luz et al. (2010), a hidrociclonagem possibilita a seleção e adequação dos materiais, consequentemente, tornou-se uma fase de grande importância durante a construção de uma barragem. A FIGURA 10 ilustra o local desse sistema em relação ao dique inicial (aterro) do barramento.

FIGURA 10 – ARRANJO TÍPICO DE HIDROCICLONES



FONTE: Department of Energy, Mines and Resources (1972) apud Luz et al. (2010)

2.4 DEPOSIÇÃO

Os rejeitos podem basicamente serem depositados em:

- Minas subterrâneas;
- Em cavas exauridas de minas;
- Em pilhas;
- Por empilhamento a seco (método *dry stacking*);
- Por disposição em pasta;
- Reuso de rejeito em materiais da construção civil;
- Disposição de rejeitos submarinos ou em profundidade; e
- Em barragens de contenção de rejeitos.

Dos métodos apresentados, o último é um dos mais comuns no Brasil. Para isso, as mineradoras, a partir de um dique de partida, utilizam solos, estéreis ou o próprio rejeito. A deposição pode ser em superfícies, de forma subterrânea ou em grandes corpos d'água. Oliveira Filho e Abrão (2015) mencionam que na disposição subterrânea, os vazios remanescentes podem ser preenchidos com diversos materiais, inclusive da própria mineração. Isso é conhecido como *backfill*.

Dispor os rejeitos a céu aberto compreende na formação de pilhas (descartados na forma sólida) em reservatório contidos por diques. E a forma

subaquática é referente ao lançamento em fundos de mares, lagos ou reservatórios. (GALVÃO, 2014).

A maneira pelo qual o material é disposto influencia o comportamento do rejeito, tanto em termos geomecânicos como em uma eventual ruptura no qual ao material é liberado. Isso ocorre em virtude da porosidade do material, seu grau de saturação, sua a velocidade de adensamento e outros fatores, esses são alterados justamente pelo tipo de disposição.

2.5 MÉTODOS CONSTRUTIVOS

As barragens de rejeito normalmente não são construídas até sua cota máxima, elas são feitas conforme o seu reservatório vai sendo preenchido pelo material remanescente da lavra. Existem três métodos para o alteamento de uma barragem de contenção de rejeitos, o método de montante, o método de jusante e o método da linha de centro. A diferença entre as situações é referente ao direcionamento do eixo da barragem conforme as etapas de construção em relação ao dique de partida (D'AGOSTINO, 2008).

O método de alteamento para montante (FIGURA 11), onde se procede com o eixo deslocando para montante (a partir do dique de partida) durante o alteamento, é o mais econômico, de acordo com Troncoso (1997 apud LAZARIM, 2015), pois obtém a menor razão entre volumes de areia/lama. Além disso, é o mais simples e requer menos espaço. Porém, D'Agostino (2008) ressalta que vários autores apontam que essa maneira é a mais crítica do ponto de vista de segurança (VICK, 1991; SOARES, 2001).

Araújo (2006 apud LAZARIM, 2015) destaca que os alteamentos são feitos sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Se forem observadas condições de saturação e o estado de compacidade fofo na areia fina, os rejeitos podem apresentar baixa resistência ao cisalhamento e estar suscetível à liquefação, seja por carregamentos dinâmicos (por exemplo, sismos) e estáticos.

FIGURA 11 – MÉTODO DE LINHA A MONTANTE

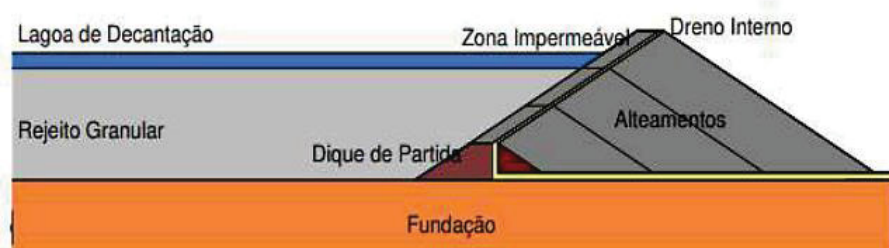


FONTE: Albuquerque (2004)

Troncoso (1997 apud SOUZA JUNIOR, 2018) afirma que rupturas por percolação e *piping* também são possíveis em virtude da pequena distância entre a lagoa de decantação e o talude de jusante. Os sistemas de drenagem e filtros evitam o acréscimo demasiado de poropressão. No entanto, existe uma dificuldade para implantar um sistema interno de drenagem eficiente para controle do nível d'água dentro do barramento (SOUZA JUNIOR, 2018) em virtude do próprio sistema construtivo (ARAÚJO, 2006).

Outro método é o alteamento pelo método de jusante (FIGURA 12), no qual, a partir do dique de partida, a construção atinge as cotas definidas em projeto se deslocando a jusante. As vantagens para esse tipo de construção são: o controle do lançamento e da compactação (conforme técnicas convencionais); nenhuma parte é apoiada ou alteada sobre o rejeito depositado; e os sistemas de drenagem interna podem ser instalados durante a construção da barragem e prolongados até a cota final do barramento (KLOHN, 1981 apud ARAÚJO, 2006). Dessa forma, o projeto é capaz de apresentar resistência necessária inclusive para condições sísmicas (ARAÚJO, 2006) e é mais estável em relação à ruptura global e à ocorrência de *piping* (LAZARIM, 2015).

FIGURA 12 – MÉTODO DE LINHA A JUSANTE

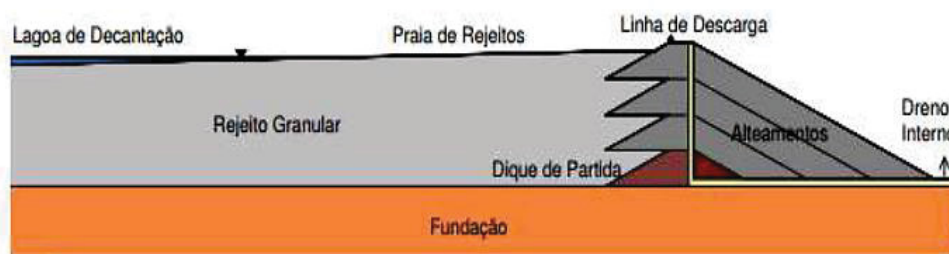


FONTE: Albuquerque (2004)

Este tipo de barragem necessita de maiores volumes de material, consequentemente, a área ocupada pelo sistema de contenção é maior, devido ao progresso da estrutura (ARAÚJO, 2006). Soares (2010 apud SOUZA JUNIOR, 2018) destaca que o alteamento acontece de forma mais lenta quando comparado aos outros métodos.

Por último, o método da linha de centro (FIGURA 13), no qual o eixo da barragem permanece na mesma posição do dique de partida para os alteamentos posteriores, ou seja, o barramento é elevada verticalmente pelo eixo central. É uma solução intermediária dos dois métodos anteriores (ALBUQUERQUE, 2004) e apresenta algumas vantagens dos dois métodos, tentando diminuir suas desvantagens (ARAÚJO, 2006). O método apresenta facilidade construtiva, menos volume de material quando comparado o método de jusante e a execução da drenagem interna para controle de fluxo d'água é facilitada pela disposição do barramento.

FIGURA 13 – MÉTODO DE LINHA DE CENTRO



FONTE: Albuquerque (2004)

Soares (2010 apud SOUZA JUNIOR, 2018) destaca que, apesar das vantagens, existem desvantagens como a técnica restringir o tipo de rejeito, sendo recomendado areias, além de escorregamentos de área de montante, a necessidade de hidrociclones e não permitir o tratamento de talude de jusante.

Cabe ressaltar que muitas empresas mineradoras brasileiras se utilizam de duas ou mais técnicas executivas para a barragem. Ou seja, há uma mescla entre os métodos, normalmente o método de jusante ou linha de centro com o de linha a montante.

2.6 POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS (PNSB)

Firmada em 2010, a lei nº 12.334 é aplicada para barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. A legislação é aplicada para barramento com pelo menos uma das seguintes características:

- Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 metros;
- Capacidade do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³;
- Reservatórios que contenham resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; e
- Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais e ambientais ou de perda de vidas humanas (este item será melhor descrito adiante).

O artigo 5º institui que a fiscalização da barragem cabe:

- I - à entidade que outorgou o direito de uso dos recursos hídricos, observado o domínio do corpo hídrico, quando o objeto for de acumulação de água, exceto para fins de aproveitamento hidrelétrico;
- II - à entidade que concedeu ou autorizou o uso do potencial hidráulico, quando se tratar de uso preponderante para fins de geração hidrelétrica;
- III - à entidade outorgante de direitos minerários para fins de disposição final ou temporária de rejeitos;
- IV - à entidade que forneceu a licença ambiental de instalação e operação para fins de disposição de resíduos industriais.

Para o caso III do artigo 5º, a entidade que outorga esse direito é a Agência Nacional de Mineração (ANM), antigo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). É importante saber essa questão, pois o modelo de avaliação varia conforme a entidade fiscalizadora, isto é decorrente das necessidades e critérios a serem observados, julgados e classificados em razão da função do barramento.

Entretanto, a estrutura de avaliação é apresentada no artigo 7º, no qual “as barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH)”. Esses critérios gerais são apresentados nos parágrafos 1º e 2º deste artigo:

“§ 1º A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo será feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem”.

“§ 2º A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem”.

De acordo com a Portaria nº 70.389 de 2017, as barragens de mineração são avaliadas conforme o anexo I deste trabalho (anexo V do documento do DNPM): Após ser analisada nos critérios, a barragem é classificada conforme o QUADRO 1.

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS DE REJEITO

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	B	C	D
BAIXO	B	C	E

FONTE: Adaptado DNPM (2017)

O outro ponto de destaque do PNSB é o Plano de Segurança de Barragens onde deve compreender algumas informações mínimas, como por exemplo, identificar o empreendedor, regra operacional dos dispositivos de descarga, e outros. Porém, o que precisa ser destacado é o Plano de Ação de Emergência (PAE). Este nem sempre é exigido, entretanto, a o artigo 11 apresenta o seguinte:

“Art. 11 - O órgão fiscalizador poderá determinar a elaboração de PAE em função da categoria de risco e do dano

potencial associado à barragem, devendo exigí-lo sempre para a barragem classificada como de dano potencial associado alto.”

O PAE estabelece quais ações devem ser executadas quando o barramento se encontrar em uma situação de emergência e elenca quais agentes devem ser notificados. Um dos itens que deve compor o plano é possuir procedimentos para identificar e noticiar condições potenciais de ruptura da barragem, além da estratégia para comunicação com as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência.

Para saber as áreas afetadas, são utilizados modelos de *Dam-Break* no qual é definido o impacto gerado a jusante em caso de ruptura de uma barragem. O estudo de inundação (integrante do PAE) procura descobrir como se propaga a cheia de acordo com o modo de ruptura da barragem, estes elencados no próximo item.

2.7 PLANO DE AÇÕES EMERGENCIAIS PARA BARRAGEM DE MINERAÇÃO

A Agência Nacional de Águas (2016) apresenta que o PAE é um documento elaborado pelo empreendedor onde devem estar as ações a serem realizadas em caso de uma situação de emergência, assim como estar identificado os agentes a serem notificados, conforme solicitado pelo Art. 12 da Lei nº 12.334/2010.

Então, para o setor de mineração, o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (Volume V do Plano de Segurança de Barragem) é um conjunto de procedimentos que tem por objetivo identificar e classificar situações que eventualmente podem colocar em risco a integridade da barragem. Sendo assim, a partir deste ponto, deve-se estabelecer ações necessárias para sanar as situações de emergência e desencadear o fluxo de comunicação com os diversos agentes envolvidos.

Nesse plano de ações deve estar contemplado a Zona de Autossalvamento (ZAS), que é a região a jusante da barragem em que não há tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em caso de acidente, conforme ANA (2016). Segundo esta, os critérios variam para cada país, porém o Brasil adota como ZAS o menor entre as seguintes distâncias: 10 km ou a distância que corresponde ao tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos.

A Portaria nº 70.389/2017 da ANM também apresenta uma definição semelhante para a Zona de Autossalvamento. A resolução define ZAS como: região

do vale à jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência, devendo-se adotar a maior das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10 km. Portanto, as duas agências reguladoras usam os mesmos critérios de 30 minutos ou 10 km, porém a ANA usa a menor destas distâncias, enquanto a ANM usa a maior desses resultados.

A resolução da ANM também define a Zona de Segurança Secundária (ZSS) que é a região constante no mapa de inundação, não definida como ZAS. Ou seja, as regiões afetadas que não são caracterizadas como ZAS, são consideradas ZSS.

Uma das informações usualmente apresentada nos mapas de inundação presentes no PAE é o risco hidrodinâmico. Este relaciona a profundidade com a velocidade e como isso pode afetar edificações e vidas humanas. Essa situação é analisada porque mesmo que um escoamento tendo uma velocidade baixa, mas possuir uma grande altura de lâmina de água, este pode causar danos. O inverso também acontece, uma altura de escoamento baixa com uma grande velocidade também pode gerar danos significativos.

Para classificar o risco, uma das referências mais usadas é de Viseu (2006), nesta referência a autora gera uma tabela com os riscos para edificações e outra para o risco para as pessoas. A TABELA 1 e TABELA 2 mostram os intervalos e suas consequências, já a FIGURA 14 ilustra as duas tabelas.

TABELA 1 – NÍVEL DE PERIGO PARA SERES HUMANOS

Nível	Classe	Inundação Estática (h)	Inundação dinâmica (h x v)
Reduzido	Verde	< 1 m	< 0,5 m ² /s
Médio	Amarelo	1 m – 3 m	0,5 m ² /s – 0,75 m ² /s
Importante	Laranja	3 m – 6 m	0,75 m ² /s – 1 m ² /s
Muito importante	Vermelho	> 6 m	> 1 m ² /s

FONTE: Adaptado Viseu, 2006

TABELA 2 – NÍVEL DE PERIGO PARA EDIFICAÇÕES

Nível	Classe	Velocidade (v)	Inundação dinâmica (h x v)
Reduzido	Verde	< 2 m/s	< 3 m ² /s
Médio	Amarelo	2 m/s – 4 m/s	3 m ² /s – 5 m ² /s
Importante	Laranja	4 m/s – 5,5 m/s	5 m ² /s – 7 m ² /s
Muito importante	Vermelho	> 5,5 m	> 7 m ² /s

FONTE: Adaptado Viseu, 2006

FIGURA 14 – DEFINIÇÃO DO RISCO HIDRODINÂMICO



FONTE: Adaptado Viseu, 2006

2.8 RUPTURA DE BARRAGENS

A ruptura é classificada como um evento no qual existe a troca de material sólido e/ou líquido decorrente de um dano parcial ou integral no barramento, cujo comportamento não é controlado.

As barragens podem romper por diversas maneiras, alguns dos mecanismos são (ELETROBRÁS, 2003):

- Rompimento de um dos taludes da barragem (montante ou jusante);
- Ruptura da fundação (fratura de rocha, deslizamento de camadas, etc.);
- Galgamento, normalmente por evento hidrológico extremo;
- Ruptura por entubamento (*piping*), em função de falhas no corpo da barragem; e
- Ações de guerra ou terrorista.

O manual técnico do *Bureau of Reclamation* (2015), ilustra que as causas mais comuns de ruptura em barragem de terra são:

- Galgamento (*overtopping*) com 35% das ocorrências;
- Erosão interna (*piping*) e infiltração com 38% das ocorrências;
- Defeitos de fundação com 21% das ocorrências;
- Outros modos de falha com 6% de ocorrências.

Porém, como as rupturas em Mariana/MG e Brumadinho/MG foram por liquefação, este tipo de modo de falha que será desenvolvido neste trabalho.

2.9 LIQUEFAÇÃO

Esse fenômeno acontece pela diminuição da resistência efetiva e da rigidez dos solos sob ação de forças externas cíclicas ou monotônicas. Essa situação ocorre geralmente em depósitos suscetíveis de materiais saturados que, apresentam tendência de contração de seu volume quando submetidos a tensões cisalhantes. Como os vazios estão preenchidos com água e o tempo para drenagem é comparativamente maior que o tempo de aplicação do carregamento, esta tendência de contração de volume na condição não-drenada corresponde em um aumento da poropressão no solo.

Caso a poropressão venha a aumentar até um valor igual ao da tensão de confinamento (σ_3), a tensão efetiva atuante no material é reduzida a zero. Com isso, o material perde sua resistência ao cisalhamento, comportando-se como um fluido viscoso. É importante ressaltar que a liquefação não ocorre ao longo de uma superfície de ruptura, mas em certas regiões da massa de solo.

O mecanismo de início do fenômeno poder ser ilustrado com auxílio do gráfico da trajetória de tensões no plano triaxial $p' : q$, conforme descreve Geo-Slope (2007). Esse gráfico ilustra a tensão desviatória (q) pela tensão efetiva média (p'). Segundo Geo-Slope (2007), q e p' são representados por:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

Equação 1

Sendo:

σ_1 = tensão principal maior; e

σ_3 = tensão principal menor.

A média das tensões efetivas é o p'

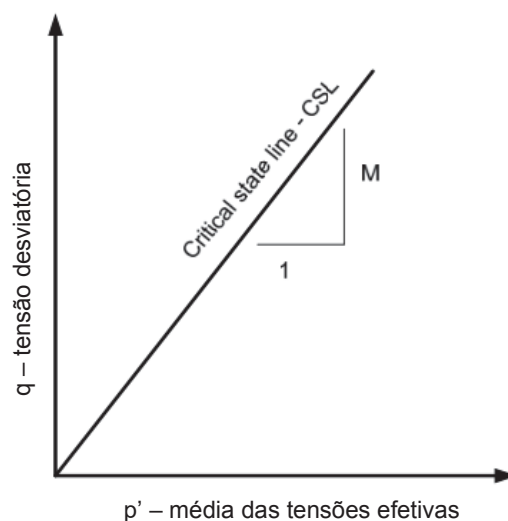
$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} \quad \text{Equação 2}$$

Para o caso do ensaio triaxial σ'_2 é igual ao σ'_3 , portanto,

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad \text{Equação 3}$$

A linha de estado crítico (*Critical State Line* – CSL), apresentada na FIGURA 15, representa a força desenvolvida em grandes deformações quando a tensão cisalhante e o volume permanecem constantes com uma deformação contínua. Essa linha é coincidente com a linha de estado permanente (*Steady-State Line* – SSL), conforme a análise de resultados de um extenso programa de ensaios triaxiais – drenados e não drenados – em areais realizados por Been et al. (1991).

FIGURA 15 – LINHA DE ESTADO CRÍTICO (*CRITICAL STATE LINE* – CSL)



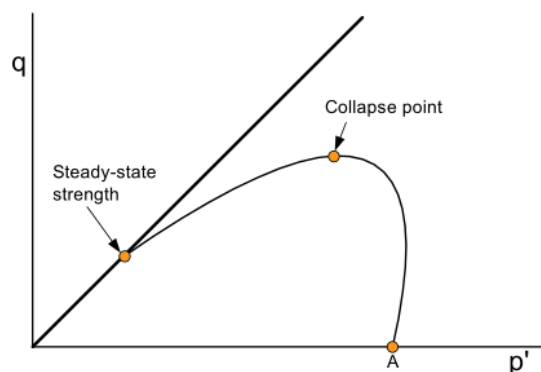
FONTE: Geo-Slope (2007)

A declividade da CSL é usualmente definida pela letra grega M (mi), e está relacionada com o ângulo de atrito efetivo (ϕ'):

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad \text{Equação 4}$$

Considerando um ensaio triaxial não-drenado em uma areia fofa consolidada por uma tensão isotrópica (Ponto A na FIGURA 16), se a amostra for carregada, a tensão efetiva, com aumento da tensão desviatória, segue um caminho de uma espécie de curva até um ponto máximo (ponto de colapso). Neste ponto existe uma tendência repentina para compressão volumétrica que é compensada por um rápido e grande incremento na poropressão. Isto leva ao decréscimo da tensão efetiva média e da tensão desviatória. A essa queda na tensão desviatória dá-se o nome de liquefação.

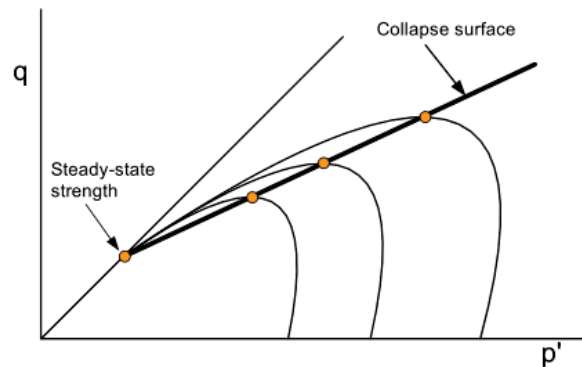
FIGURA 16 – PONTO DE ESTADO PERMANENTE E PONTO DE COLAPSO



FONTE: GeoSlope (2007)

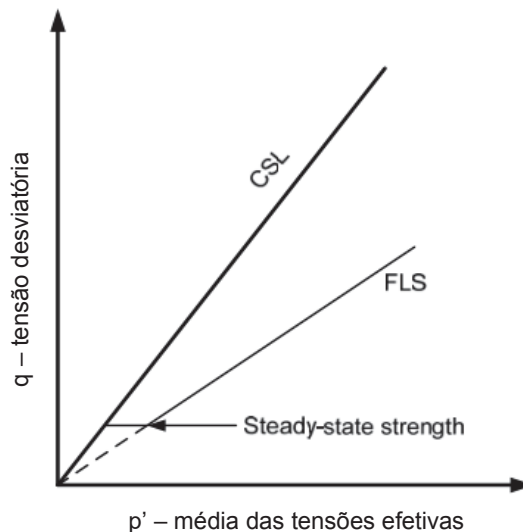
Ao se realizar vários testes, nota-se uma trajetória das curvas, no qual pode ser traçado uma linha reta pelos pontos de colapso, picos de cada curva. Sladen et al. (1985) chamam essa reta de superfície de colapso (*Collapse Surface*) e Kramer (1996) a chamou de *Flow Liquefaction Surface* (FLS), ou seja, superfície de fluxo por liquefação. Como a *Collapse Surface* ou FLS não pode ocorrer acima do ponto de estado permanente (CSL), essa linha é usualmente interrompida nesse ponto, conforme ilustra a FIGURA 17 e a FIGURA 18 (Kramer, 1996):

FIGURA 17 – SUPERFÍCIE DE COLAPSO (COLLAPSE SURFACE)



FONTE: GeoSlope (2007)

FIGURA 18 – LINHA DE ESTADO CRÍTICO (CSL) E LINHA DE FLUXO POR LIQUEFAÇÃO (FLS)



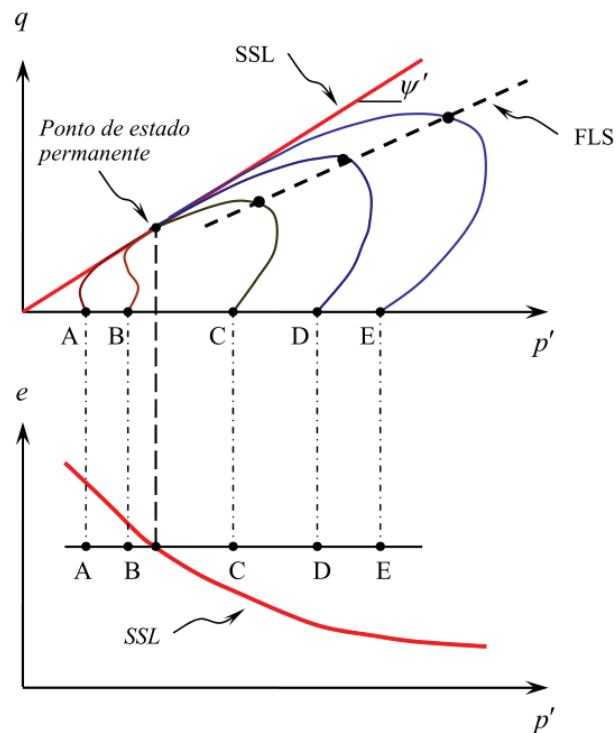
FONTE: GeoSlope (2007)

Ao se observar a FIGURA 19 nota-se um aspecto importante, os estados de tensão inicial das amostras A e B localizam-se abaixo da SSL (análogo à CSL), com comportamento contrativo sob cisalhamento, enquanto as outras amostras (C, D e E), situadas acima da CSL, exibem comportamento dilatante, atingindo um pico de resistência não-drenada e deformando-se rapidamente em seguida até atingir a CSL. Esses picos são os que formam a superfície de colapso ou FLS. Os pontos A e B se “direcionam” para o ponto de estado permanente (*Steady-State Strength*)

A situação retratada nos pontos A e B é usualmente denominada como liquefação estática; esta ocorre quando é imposto um carregamento não drenado em um solo cujo comportamento é contrativo. Portanto, para que uma massa de solo se

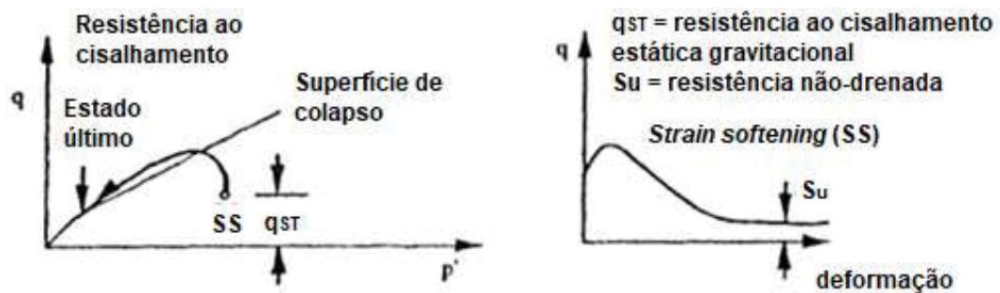
rompa nessa condição é necessário que uma quantidade suficiente de material possua comportamento de amolecimento (*strain softening*). Ou seja, as tensões cisalhantes atingem um pico e sofrem uma redução podendo atingir o estado crítico (FIGURA 20), onde o solo se deforma sob condições de volume e tensões constante, segundo Nierwinski (2019).

FIGURA 19 – COMPORTAMENTO SOBRE A LINHA DE ESTADO CRÍTICO



FONTE: Adaptado Kramer (1996)

FIGURA 20 – COMPORTAMENTO DE SOLOS SOLTOS DURANTE O CISALHAMENTO NÃO DRENADO (STRAIN SOFTENING)

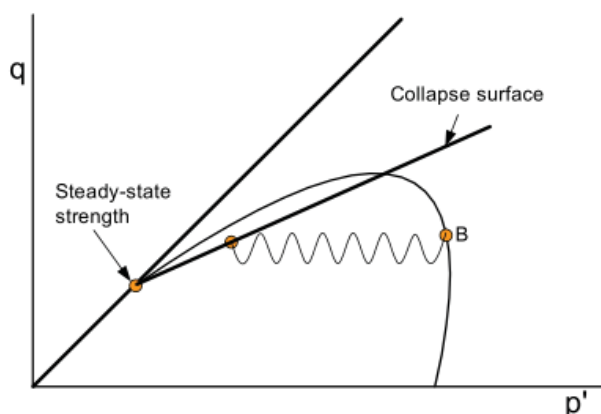


FONTE: Adaptado de Robertson e Fear (1995, apud Nierwinski, 2019)

Um carregamento cíclico pode levar à liquefação (amolecimento cíclico), conforme a FIGURA 21. Considerando um solo no ponto B, sujeito a um carregamento cíclico, este causa um aumento nas poropressões e, conseqüentemente, uma diminuição em p' até que o trajeto de tensão intercepta a superfície de colapso. Sob condições saturadas não drenadas, a areia pode liquefazer e a resistência cai ao longo da superfície de colapso até o ponto de estado permanente.

Diferentemente de areias fofas, areias densas quando submetidas a um carregamento não drenado sofrem um processo de endurecimento (*strain hardening*), com isso o comportamento é denominado dilatante. Segundo Nierwinski (2019), nesse caso somente um carregamento cíclico, poderia levar o material à liquefação. Este fenômeno só ocorre quando esse carregamento cíclico provoca tensões de cisalhamento inversas e é elevado ao ponto de gerar tensões efetivas nulas. Quando estas se anulam, não há tensão de cisalhamento, e caso existam tensões de cisalhamento novamente, as poropressões reduzem em função do comportamento dilatante do material. Elaborado por Nierwinski (2019), o QUADRO 2 ao final dessa seção mostra um resumo das características de liquefação.

FIGURA 21 – LIQUEFAÇÃO POR CARREGAMENTO CÍCLICO



FONTE: GeoSlope (2007)

Para definir a FLS (Superfície de Colapso), dois parâmetros são necessários no plano $p' : q$, o primeiro é sua inclinação – definido por M_L – e o intercepto (q_{ss}) com a CSL. O parâmetro q_{ss} representa o ponto de estado permanente (*Steady-State Strength*) e segundo GeoSlope (2007) é aproximadamente $2C_{ss}$, este definido como a interseção da *Collapse Line* com a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb em um

plano $\tau : \sigma$ (τ tensão de cisalhamento e σ tensão axial) . A inclinação (M_L) pode ser dada pela relação com o ângulo de atrito (ϕ'_L) da superfície de colapso:

$$M_L = \frac{6 \sin \phi'_L}{3 - \sin \phi'_L} \quad \text{Equação 5}$$

Essa superfície aumenta conforme a densidade do material aumenta, conforme Geo-Slope (2007). Chu et al (2003 apud GEO-SLOPE, 2007) demonstraram que a inclinação de ϕ'_L varia entre $18,3^\circ$ e $34,5^\circ$ – M_L entre 0,7 e 1,4 – para materiais com índice de vazios igual a 0,972 e 0,864 - estes considerados elevados. Sladen et al. (1985 apud GEO-SLOPE, 2007) mostraram que para areias consolidadas isotropicamente ϕ'_L mínimo é de $14,3^\circ$ e o máximo é de $18,5^\circ$ e Kramer (1996 apud GEO-SLOPE, 2007) afirma que para condições iniciais isotrópicas, o ϕ'_L é usualmente dois terços da ϕ' em areias.

QUADRO 2 – RESUMO DE CARACTERÍSTICAS DOS FENÔMENOS DE LIQUEFAÇÃO

Fenômeno/ característica	Fluxo por liquefação	Amolecimento cíclico	
		Liquefação cíclica	Mobilidade cíclica
Condições de carregamento	Monotônico ou cíclico	Cíclico com tensões inversas	Cíclico sem tensões inversas
Drenagem	Não drenado	Não drenado	Não drenado
Resposta do solo ao carregamento	<i>Strain softening</i>	<i>Strain softening ou strain hardening</i>	<i>Strain softening ou strain hardening</i>
Controle de tensões	Tensões cisalhantes estáticas	Tensões cisalhantes cíclicas e estáticas	Tensões cisalhantes cíclicas e estáticas
Estado de tensões induzido	Tensão cisalhante de campo é maior que a tensão cisalhantes mínima não drenada.	Estado de tensões efetivas chega a zero.	Tensões efetivas nulas não são produzidas.
Potencial de ruptura ou deformação	Volume suficiente de solo sofre strain softening. A ruptura pode ser por deslizamento ou fluxo dependendo da geometria e estado de tensões.	Grandes deformações podem ser atingidas durante carregamentos cíclicos. As deformações tendem a estabilizar com o fim do carregamento cíclico.	Pequenas deformações, a não ser que um solo muito solto venha a sofrer fluxo por liquefação.

Fenômeno/ característica	Fluxo por liquefação	Amolecimento cíclico	
		Liquefação cíclica	Mobilidade cíclica
Tipos de solo	Qualquer solo saturado metaestável, depósitos de solos granulares soltos, argilas muito sensíveis e depósitos de siltes.	Quase todas as areias saturadas. Deformações limitadas em solos argilosos.	Quase todas as areias saturadas. Deformações limitadas em solos argilosos.

FONTE: Nierwinski (2019)

2.9.1 Análise pseudoestática

Um tipo de análise utilizada para avaliar a situação da barragem contra um sismo é utilizando a análise pseudoestática. Nela é atribuída uma aceleração na direção vertical e horizontal, sendo usualmente aplicado no Brasil um percentual da aceleração da gravidade, conforme o Eletrobrás (2003). Melo e Sharma (2004) separaram alguns coeficientes horizontais recomendados conforme diversos autores, constantes na TABELA 3.

TABELA 3 – COEFICIENTES HORIZONTAIS DE SISMO

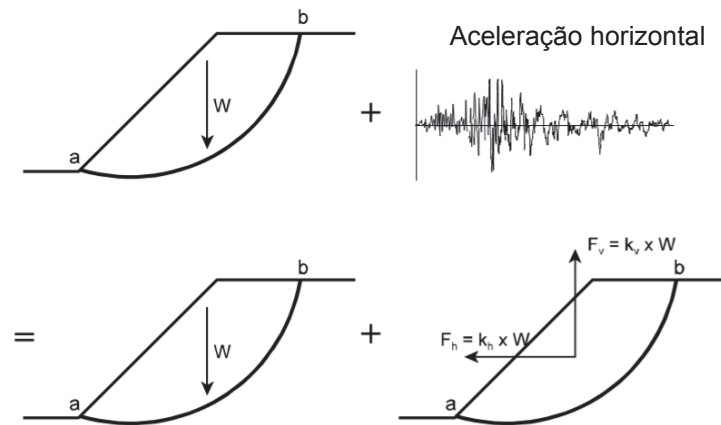
Coeficiente horizontal de sismo (Kh)	Descrição		
0,05 – 0,15	Nos Estados Unidos		
0,12 – 0,25	No Japão		
0,1	Terremoto “severo”		
0,2	Terremoto “violento, destrutivo”	Terzaghi	
0,5	Terremoto “catastrófico”		
0,1 – 0,2	Seed, FS ≥ 1,15		
0,1	Terremoto “principal”	Corps of Engineers	
0,15	Terremoto “grandioso”		
1/2 a 1/3 do PAH	Marcuson, FS > 1,0		
½ do PAH	Hynes-Griffin, FS > 1,0		

*FS = fator de segurança; PAH = pico da aceleração horizontal, em g's.

FONTE: Adaptado Melo e Sharma (2004)

A FIGURA 22 mostra como são aplicados esses coeficientes, facilitando o entendimento:

FIGURA 22 – APLICAÇÃO DO COEFICIENTE DE ACELERAÇÃO SÍSMICA



FONTE: Adaptado Melo e Sharma (2004)

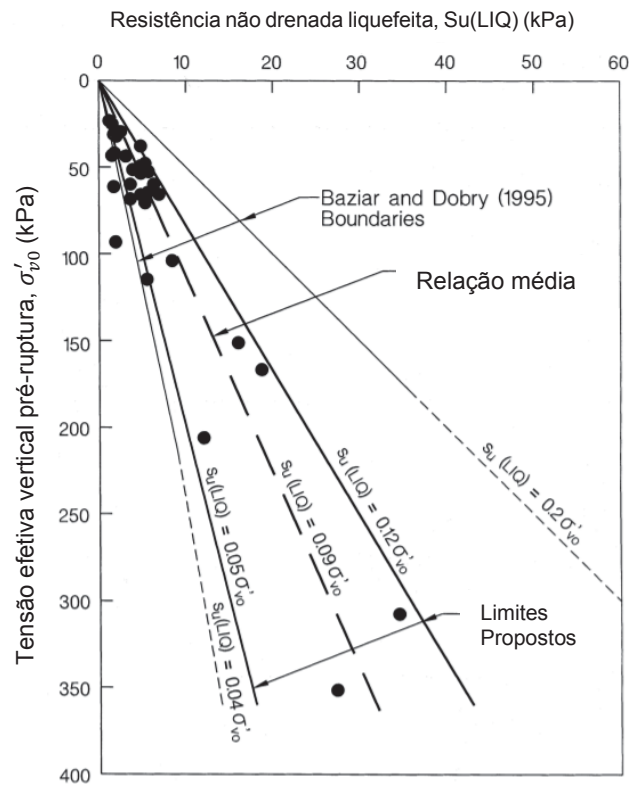
Apesar de simples, ele é muito utilizado, porém sua dificuldade é escolher o seu principal parâmetro. Cabe ao responsável escolher qual vai ser utilizado com base na experiência (pessoal, nacional ou internacional) e também para eventuais situações que possam existir (condição geológica desfavorável, trânsito intenso de veículos ou outro mecanismo de indução de sismo).

Essa análise é a que está implantada no *software* Slide 3 da Rocscience, não sendo possível utilizar análises mais complexas. O próprio Slide 2, da mesma empresa e que faz as análises em duas dimensões (2D), possui outras maneiras de verificação mais elaboradas, porém o modelo tridimensional só possui a pseudoestática. Em virtude dessa situação, esse tipo de método foi utilizado para auferir o volume de material liberado na ruptura e gerar a vazão para o escoamento do fluido não newtoniano, apesar de não propriamente uma situação de liquefação.

Outra propriedade que deve ser definida é a resistência do material a ser utilizada no modelo numérico. Como a amostrada coletada foi deformada e não se tratava de um material coletado em um barramento real, foi necessário estipular esta propriedade no solo. Para isso foi utilizada a relação entre tensão efetiva vertical e resistência não drenada liquefeita apresentado por Olson e Stark (2002), no qual depois de uma série de ensaios e coleta de informações em casos reais, chegou-se

FIGURA 23, sendo esta relação chamada de *liquified strength ratio* (razão de resistência liquefeita, em tradução livre)

FIGURA 23 – RELAÇÃO ENTRE TENSÃO EFETIVA VERTICAL E RESISTÊNCIA NÃO DRENADA PÓS-LIQUEFAÇÃO



FONTE: Olson e Stark (2002).

Foi adotado o limite inferior para a $S_u(LIQ)$ do material, porém ainda é necessário definir o peso específico do material. Este foi retirado de bibliografia; no entanto, como para a liquefação acontecer o material deve ter todos seus vazios preenchidos por água e atribuir uma linha piezométrica resultaria em um cenário menos pessimista em termos de liberação de volume do reservatório, foi utilizado o peso específico submerso. Este difere do peso específico saturado e é definido pela Equação 6, porém nada mais é que o peso específico do material saturado (γ_{sat}) menos o peso específico da água (γ_w):

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

Equação 6

2.9.2 Suscetibilidade dos materiais à liquefação

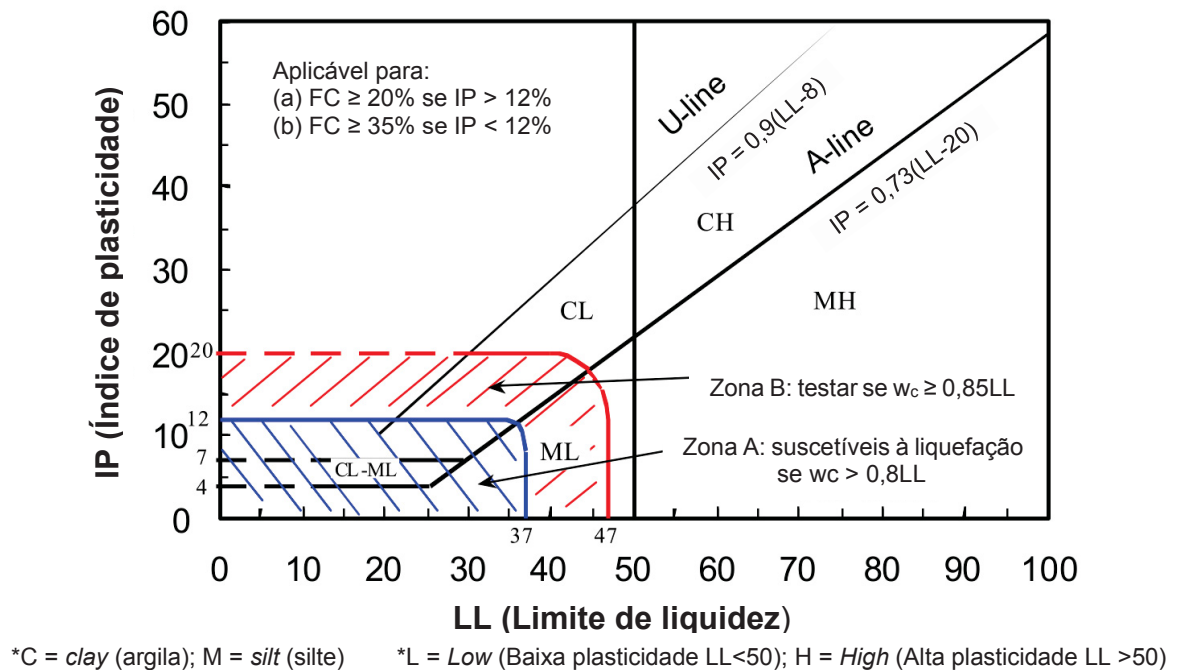
Por tempos acreditou-se que a liquefação era restrita apenas às areias, ou seja, solos com granulometria mais fina eram julgados como imunes a gerar altos valores poropressão associados com a liquefação. Porém, a liquefação de siltes não-plásticos foi observada em campo e em laboratório, mostrando que características de plasticidade são mais influentes que a distribuição granulométrica para o caso de solos finos (o valor para a fração fina varia conforme as normativas que cada país adota).

Wang (1979 apud SEED et al., 2003) afirma que, para o caso chinês, se o solo possuir as seguintes condições, este pode ser considerado suscetível à liquefação (a) Fração fina (diâmetro menor que 0,005 mm) $\leq 15\%$ ($FC \leq 15\%$); (b) Limite de liquidez $\leq 30\%$ ($LL \leq 30\%$) e (c) Teor de umidade $w_c \geq 0,9LL$ (limite de liquidez).

Andrews et al. (2000) modificaram um pouco o critério chinês, recomendando que (1) solos com fração fina (diâmetro menor que 0,002 mm) $FC < 10\%$ e limite de liquidez $LL < 32\%$, sejam considerados como potencialmente suscetíveis à liquefação; (2) solos com fração fina $FC > 10\%$ e $LL \geq 32\%$ sejam classificados como improváveis à ocorrência de liquefação; (3) solos com propriedades intermediárias devem ter seu comportamento avaliado através de ensaios de laboratório para verificar sua suscetibilidade à liquefação.

Entretanto, Seed et al. (2003) sugerem que a susceptibilidade seja definida por regiões, resumidas na FIGURA 24, similar à carta de Casagrande (limite de liquidez – LL – versus o índice de plasticidade – IP), recomendando o abandono do critério chinês modificado.

FIGURA 24 – SUSCEPTIBILIDADE DOS MATERIAIS À LIQUEFAÇÃO: CRITÉRIO SEED ET AL.



FONTE: Seed et al. (2003)

As três regiões são

- a) Zona A: solos potencialmente suscetíveis à liquefação induzida basicamente por carregamentos cíclicos;
- a) Zona B: solos podem ser suscetíveis à liquefação tanto por carregamento cíclico ou monotônico;
- b) Zona C: não são suscetíveis à liquefação por carregamento cíclico, sendo que a suscetibilidade ao carregamento monotônico deve ser verificada.

Com essa classificação tem-se um primeiro passo para verificar se o material pode sofrer liquefação. Após essa análise existem outras que devem ser realizadas, como por exemplo, se o solo possui comportamento dilatante ou contrátil, avaliar o índice de vazios e os gráficos $p : q$, como ilustrados na FIGURA 19 e FIGURA 20, somente assim é possível garantir a verificação contra a liquefação. Entretanto, análises de susceptibilidade dos materiais à liquefação como a apresentada direcionam estudos, fazendo com que recursos financeiros e tempo sejam poupados no processo de avaliação.

2.10 MODELOS DE FLUXO

Para modelar o fluxo de rejeito liberado por uma ruptura de barragem existem duas aproximações: Método de Equilíbrio das Forças Simplificado (Vick, 1991) e Modelos de Fluxo Fluido (Blight et al., 1991 e Jeyapalan et al. 1983).

2.10.1 Modelo de Equilíbrio das Forças Simplificado

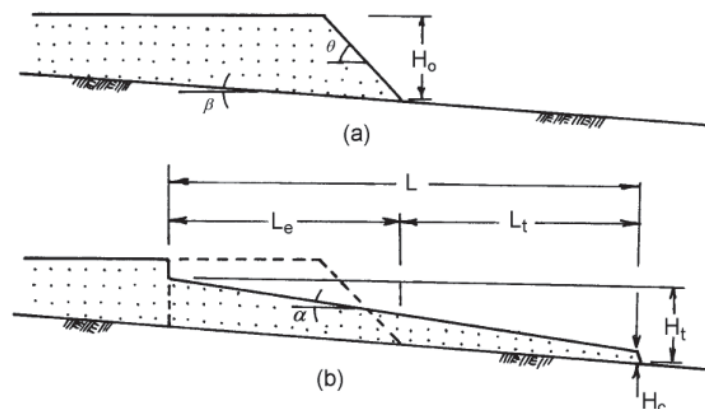
Este modelo se baseia no equilíbrio bidimensional de forças simples para prever a distância de espalhamento da lama. Lucia (1981) desenvolveu esse modelo com base na configuração final do rejeito após a ruptura em 14 casos históricos. O modelo de equilíbrio de forças admite que no instante que o fluxo de lama atinge a situação de repouso, a resistência ao cisalhamento do rejeito ao longo de sua base é igual à resistência requerida para existir o equilíbrio estático.

Por ser oriundo da retroanálise de casos históricos, o modelo é limitado para terrenos com inclinação de cerca de 4 graus e para material (rejeito ou solos) cuja resistência ao cisalhamento seja entre 1 a 17 kPa.

Nesse modelo é necessária a especificação de parâmetros como:

- Resistência liquefeita ao cisalhamento não drenada;
- Massa específica dos rejeitos;
- Volume de rejeitos que será escoado por unidade média da brecha;
- Declividade média do trecho a jusante.

FIGURA 25 – GEOMETRIA IDEALIZADA PARA ANÁLISE DO EQUILÍBRIO DE FORÇAS



FONTE Lucia (1981) apud Lazarim (2015)

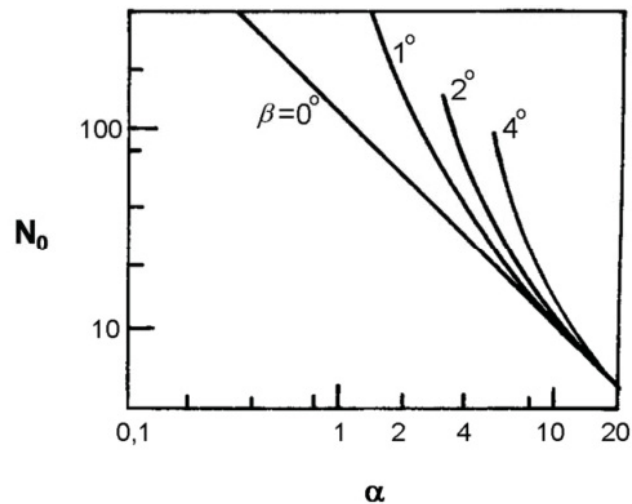
LEGENDA (a) Condições iniciais (b) Condições após a ruptura

A altura do fluxo de lama (H_t) pode ser calculada com a resistência não drenada (S_u) e o peso específico total (γ)

$$H_t = \frac{N_0 \cdot S_u}{\gamma} \quad \text{Equação 7}$$

O N_0 é encontrado pela FIGURA 26 e varia conforme a inclinação do terreno (β) e a inclinação do fluxo de lama (α).

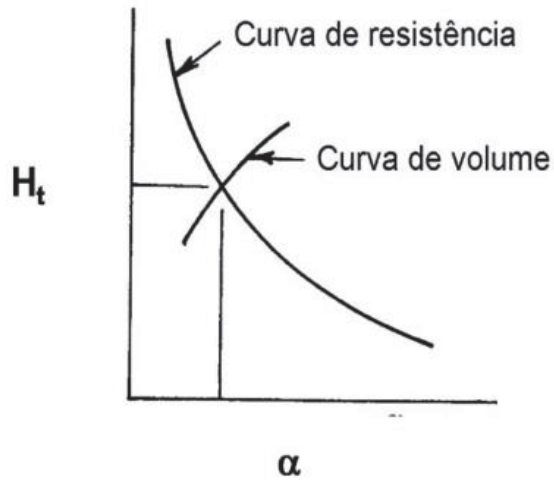
FIGURA 26 – CARTA DE ESTABILIDADE



FONTE: Adaptado Lucia (1981) apud Lazarim (2015)

Correlacionando a altura de H_t com a inclinação α , a FIGURA 27 ilustra um gráfico com duas curvas, uma curva de resistência feita por tentativas na Equação para H_t e com auxílio da FIGURA 26 e uma de volume para os respectivos valores de α utilizados nas tentativas. “A interseção da curva de resistência com a curva de volume, mostrada na FIGURA 27 define as condições limites onde o fluxo atinge o repouso” Lazarim (2015).

FIGURA 27 – CURVA DE RESISTÊNCIA E DE VOLUME



FONTE: Adaptado Lucia (1981) apud Lazarim (2015)

Para o caso do β ser igual a zero, o volume pode ser definido por:

$$H_t = (H_c^2 + 2 \cdot V_f \cdot \operatorname{tg} \alpha)^{1/2} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo V_f igual ao volume do fluxo de lama por unidade de largura da brecha da barragem e o H_c calculado por:

$$H_c = \frac{4S_u}{\gamma} \quad \text{Equação 9}$$

Segundo GeoHydroTech (2010) apud Lazarim (2015), para valores diferentes de β , usa-se a expressão:

$$H_t = \frac{\operatorname{tg} \alpha [H_c^2 + 2 \cdot V_f \cdot (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta)]^{1/2} - H_c \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta} \quad \text{Equação 10}$$

Para os valores obtidos para H_t e α , a distância de espalhamento L é calculada por:

$$L = \frac{H_t - H_c}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \text{Equação 11}$$

A distância L representa o espalhamento do fluxo acrescido da distância a montante do pé de jusante da barragem (L_e). Por continuidade de volume e terreno horizontal ($\beta=0$), o valor de L_e definido por:

$$L_e = \frac{V_f}{H_0} + \frac{H_0}{2 \cdot \tan \theta} \quad \text{Equação 12}$$

Portanto, a distância de espalhamento do rejeito é:

$$L_t = L - L_e \quad \text{Equação 13}$$

Entretanto, esse modelo proposto por Lucia (1981) apresenta grandes erros de previsão para ruptura propagada em talvegues que possuem amplas variações na inclinação, conforme Melo (2014).

2.10.2 Modelos de fluxo de fluido

Utilizando a mecânica dos fluidos, existem alguns modelos que podem ser utilizados, a diferença entre eles são os procedimentos analíticos. Blight et al. (1981) admitiram a ocorrência de fluxo estabelecido para estimar a espessura do fluxo de lama. Em um fluido newtoniano, conforme aumenta-se a taxa de variação da velocidade em relação à profundidade, aumenta-se o valor do cisalhamento no fluido. Essa variação acontece a proporção constante dada pela viscosidade dinâmica (μ).

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{Equação 14}$$

Sendo:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

μ = viscosidade dinâmica (Pa.s);

$\frac{\partial u}{\partial y}$ = gradiente de velocidade (s^{-1}).

Em sua experiência os autores, por meio de uma retro-análise da ruptura, conseguiram boa concordância com o fluxo de lama da Barragem de Bafokeng em 1974. Porém, Lazarim (2015) ressalta que o ensaio realizando o viscosímetro só pode ser feito com alto teor de umidade, o que representa a porção superior do reservatório. Isso acontece devido à concentração de sedimentos determinar se o fluido é ou não newtoniano (Ferreira, 2007) e Maciel et al. (2009) afirmam que usualmente mistura um fluido newtoniano com partículas sólidas resulta em um fluido não-newtoniano.

Para fluidos não newtonianos, existem diversos modelos para se adequar as propriedades reológicas do material. Para muitas aplicações da engenharia, a relação entre tensões cisalhantes e a taxa de deformação podem ser expressa pelo modelo exponencial, usualmente conhecido como lei das potências (*Power Law*), determinado por Ostwald (1925), no qual:

$$\tau = \mu_n \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad \text{Equação 15}$$

No qual o n é o índice de escoamento do fluido, e indica se o fluido é pseudoplástico ou dilatante. Um fluido pseudoplástico apresenta uma diminuição da viscosidade conforme aumenta-se a tensão de cisalhamento. Isto acontece, pois, em repouso, o material possui suas moléculas desordenadas e quando submetido a uma tensão, essas se orientam na direção da força aplicada, diminuindo a viscosidade. Esse cenário é modelado através de um $n < 1$ na equação anterior.

O fluido dilatante apresenta propriedades contrárias ao pseudoplástico, ou seja, com o aumento o cisalhamento ocorre o aumento da viscosidade. Ferreira (2007) exemplifica que isso acontece em suspensões, no qual, a lubrificação entre as partículas diminui, conforme é acrescido a tensão cisalhante. O líquido entre as partículas não preenche o espaço entre elas, gerando um contato direto, o que consequentemente aumenta a viscosidade. Para representar essa situação a equação da tensão de cisalhamento, deve ter um $n > 1$.

Existem fluidos em que só começam a escoar quando uma determinada tensão de cisalhamento mínima é atingida. Abaixo desta tensão, o fluido se comporta como um sólido elástico. Portanto, o fluido resiste a uma tensão, chamada de tensão crítica de cisalhamento ou tensão inicial de escoamento (ou de corte). Um fluido que apresenta essas características é o fluido de Bingham, que apresenta essa tensão

crítica e taxa de deformação linear, e que é matematicamente representado por (Adaptado Bingham e Green, 1920 apud Ferreira, 2007):

$$\tau = \tau_y + \mu_B \frac{\partial u}{\partial y}, \text{ para } \tau > \tau_y$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \text{para } \tau < \tau_y$$

Equação 16

Sendo:

τ_y = tensão crítica;

μ_B = Viscosidade plástica.

Jeyapalan et al. (1983) assumiram um fluido não newtoniano, cujas propriedades eram de um fluido plástico não newtoniano (Bingham), que possuía viscosidade plástica e uma resistência ao cisalhamento residual. Porém, nesse experimento, estas propriedades não foram medidas e sim atribuídos. Dessa maneira não ouve uma predição do comportamento e sim uma concordância com a aplicação em casos de ruptura de barragens de rejeito com fluxo de lama.

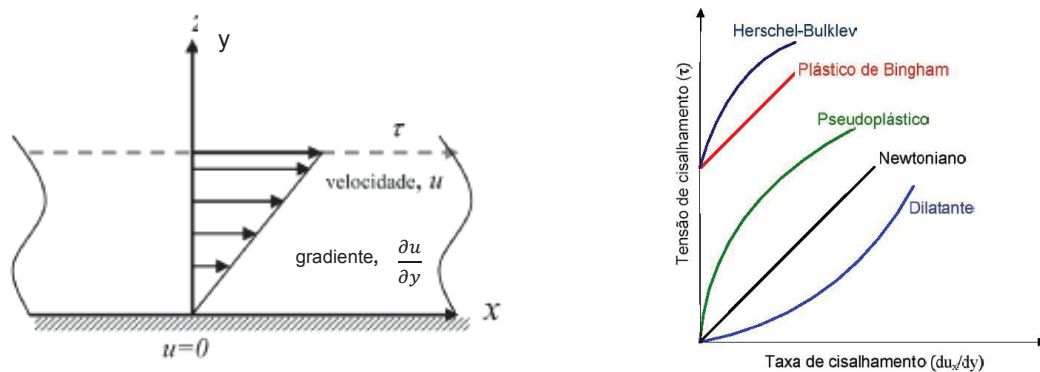
Herschel e Bulkley (1926), apresentaram uma proposta mais generalizada para o fluido plástico de Bingham (também chamado *Full Bingham fluid* ou Bingham completo), no qual a relação entre o cisalhamento e taxa de deformação não é linear. Esta não linearidade é atribuída ao expoente n :

$$\tau = \tau_y + \mu_n \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n, \text{ para } \tau > \tau_y$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \text{para } \tau < \tau_y$$

Equação 17

FIGURA 28 – TENSÃO DE CISALHAMENTO



FONTE: Adaptado Ferreira (2007)

2.10.2.1 Reometria

Para determinar a viscosidade e a tensão limite de escoamento (propriedades reológicas), são utilizados equipamentos específicos, os viscosímetros e os reômetros. De acordo com Nascimento (2008), o termo reometria é empregue para descrever o conjunto de técnicas experimentais para determinar essas propriedades.

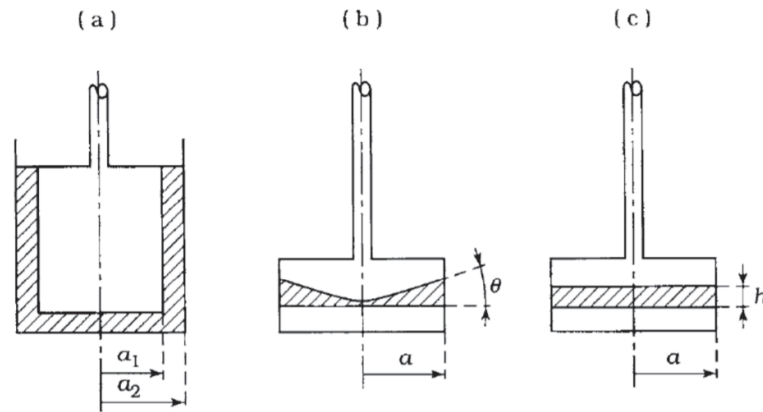
Machado (2017) comenta que viscosímetros são equipamento que, através de um cisalhamento contínuo, permite determinar os parâmetros viscosos do fluido. Machado (2017) afirma que os reômetros vão além, pois possuem capacidade de medir propriedades viscoelásticas de sólidos, semi-sólidos e fluidos. Ribeiro (2015) ressalta que os reômetros constroem reogramas completos, contendo o comportamento do material variável no tempo. Os viscosímetros determinam a resistência ao fluxo para uma solicitação específica, contudo, Nascimento (2008) destaca que os viscosímetros ainda são largamente utilizados devido ao baixo custo.

Obter as propriedades reológicas torna-se uma tarefa complexa quando as amostras ensaiadas são caracterizadas como sendo suspensões heterogêneas de alta densidade das partículas (Akroyd e Nguyen, 2003 apud Machado, 2017). Dessa forma, a homogeneidade da mistura é importante para obter as propriedades reológicas mais precisas e confiáveis, principalmente durante os ensaios.

Conforme Nascimento (2008), os reômetros rotacionais possuem várias geometrias, sendo sua escolha atrelada às características físicas das amostras e condições de análise. O tipo cilindro coaxial é adequado para amostras com baixa viscosidade (suspensões e soluções), o tipo cone e placa ou placas paralelas para pastas viscosas e polímeros fundidos. Ressalta-se que os reômetros são os

equipamentos mais completos para as medições das grandezas que caracterizam as propriedades reológicas.

FIGURA 29 – GEOMETRIA DOS REÔMETROS ROTACIONAIS



(a) cilindros coaxiais; (b) cone-placa; (c) placa-placa

FONTE Vliet & Lyklema (2005) apud Galindo (2013)

De uma maneira geral, os reômetros rotacionais podem funcionar com tensão fixa, taxa de cisalhamento fixa ou incremento da tensão. De acordo com Galindo (2013), os equipamentos rotacionais podem ser classificados quanto à variável controlada no ensaio (tensão ou deformação controlada) ou em relação à geometria do sensor (cilindros coaxiais, cone-placa e placa-placa, FIGURA 29). Galindo (2013) ainda descreve que reômetros de tensão controlada impõem uma tensão pré-definida e determina-se a taxa de cisalhamento resultante. Já para os reômetros de deformação controlada, uma taxa de cisalhamento é imposta e a tensão resultante é determinada.

Um outro método é o *slump*, este originalmente desenvolvido para testar a trabalhabilidade do concreto, também pode ser empregue para materiais minerais com as devidas adaptações (CLAYTON et al., 2003). Neste método, coloca-se um material tipo pasta em um recipiente aberto nas duas extremidades. O recipiente é levantado e a mede-se o abatimento que o material teve em relação à altura original (recipiente). A seguir é mostrado os cálculos necessários para determinar a tensão limite de escoamento a partir do teste de *slump*:

$$s' = \frac{s}{H}$$

Equação 18

$$\tau_{y'} = 0,5 - 0,5\sqrt{s'} \quad \text{Equação 19}$$

$$\tau_y = \tau_{y'} \cdot \rho g H \quad \text{Equação 20}$$

Sendo

τ_y = tensão limite de escoamento (Pa);

$\tau_{y'}$ = tensão de escoamento adimensional;

ρ = massa específica do material (kg/m³);

H = altura total do recipiente (mm);

s = altura de abatimento do cone ou cilindro, denominando *slump* (mm);

s' = medida do *slump* adimensional;

g = aceleração da gravidade, adotada com valor 9,81 m/s².

O'Brien & Julien (1985) advertem que os ensaios realizados auxiliam na compreensão das propriedades físicas e reológicas dos fluxos hiperconcentrados, os quais são caracterizados principalmente pelas curvas de:

- Tensão cisalhante x Taxa de cisalhamento;
- Viscosidade x Concentração volumétrica;
- Tensão de escoamento x Concentração volumétrica.

2.11 EQUAÇÕES DE ÁGUAS RASAS PARA FLUIDO NEWTONIANO E NÃO NEWTONIANO

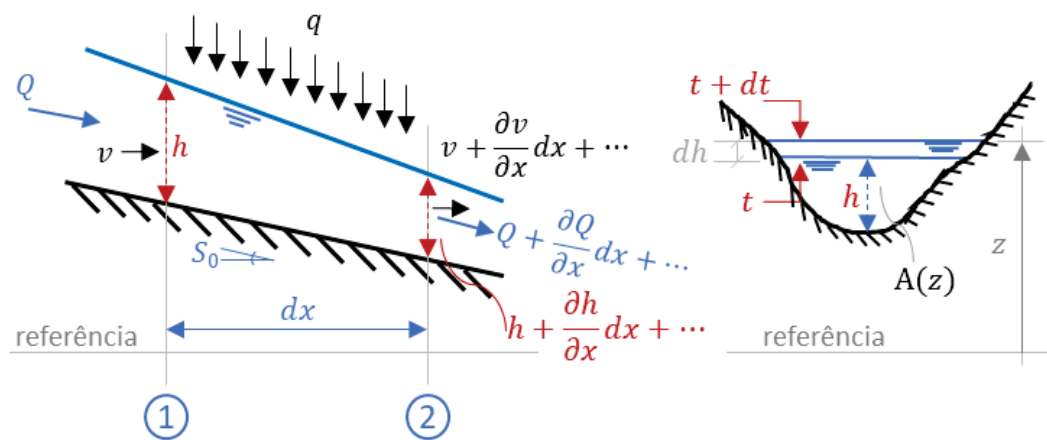
Usualmente, para fluidos newtonianos que escoam em decorrência de uma ruptura de barragem, as equações de Saint-Venant são utilizadas. Tais equações são decorrentes de simplificações nas equações de Navier-Stokes. Para estabelecer um fluxo não permanente de água são utilizadas duas equações, a continuidade e a conservação da quantidade de movimento.

Para estabelecer as equações de águas rasas (Saint-Venant), algumas simplificações são adotadas:

- Distribuição hidrostática de pressões ($p = \gamma h$);
- Fluido incompressível e homogêneo (ρ e μ constantes);

- Canal de baixa declividade, de modo que:
 - $\cos \theta \approx 1$; e
 - $\sin \theta \approx \tan \theta = S_0$.
- As perdas por atrito tanto no escoamento não permanente quanto para permanente são assumidas iguais sob as mesmas condições de profundidade e velocidade ($S_{f_{\text{não permanente}}} = S_{f_{\text{permanente}}}$);
- Escoamento unidirecional (1D, preferencialmente na direção x).

FIGURA 30 – ESCOAMENTO EM CANAL



FONTE: adaptado de Fabiani (2018)

Analisando a FIGURA 30, que representa um volume de controle em um canal aberto, obtemos o seguinte para a continuidade:

$$[Massa \text{ que entra}] - [Massa \text{ que sai}] = [Massa \text{ acumulada}]$$

$$[Q \cdot \rho \cdot dt + q \cdot dx \cdot \rho \cdot dt] - \left[\left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) \rho \cdot dt \right] = \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot A \cdot dx) dt \right]$$

Simplificando:

$$[q \cdot dx \cdot \rho] - \left[\frac{\partial Q}{\partial x} dx \cdot \rho \right] = \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot A \cdot dx) \right]$$

Dividindo por $\rho \cdot dx$ chega-se à primeira equação de Saint-Venant

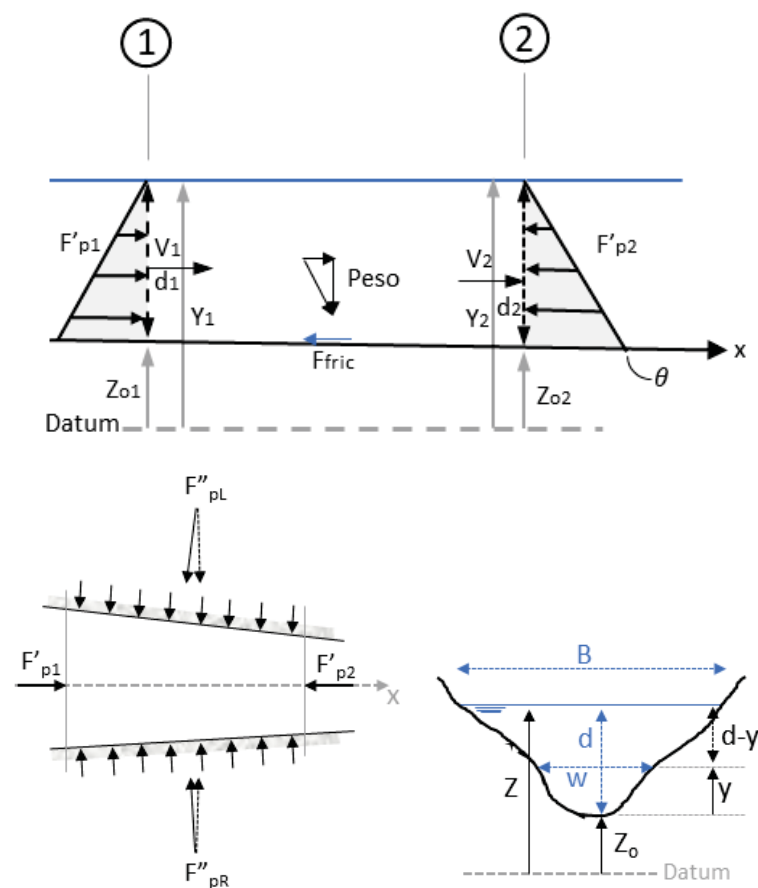
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Equação 21

Conforme Porto (2006), o somatório de todas as forças que atuam sobre o fluido contido no volume de controle é igual ao fluxo por unidade de tempo da quantidade de movimento através da superfície de controle, mais a variação por unidade de tempo da quantidade de movimento da massa no interior do volume de controle.

$$[\Sigma \text{forças}] = [\text{fluxo por unid. de tempo da qtde de mov.}] + [\text{variação qtde de mov. no tempo}]$$

FIGURA 31 – FORÇAS ATUANTES EM UM ESCOAMENTO EM CANAL



FONTE: adaptado Fabiani (2018)

Forças

a) Gravidade

$$F_g = \rho(A \cdot dx)g \cdot \sin\theta$$

$$\sin\theta \approx \tan\theta = S_0$$

$$F_g = \rho(A \cdot dx)g \cdot S_0$$

b) Forças viscosas (atrito)

$$F_\tau = -\tau \cdot P \cdot dx$$

$$\tau = \frac{F}{A} = -\mu \frac{dx}{dt}$$

$$\tau = \rho g R S_f$$

$$F_\tau = -\rho g (A \cdot dx) S_f$$

c) Pressão

$$F_p = \int_0^h \rho g (d - y) \cdot b \cdot dy$$

$$F_{p1} = \rho g A_1 \bar{h}_1$$

$$F_{p2} = \rho g A_2 \bar{h}_2 = \rho g \left(A + \frac{dA}{dx} dx \right) \left(\bar{h} + \frac{d\bar{h}}{dx} dx \right)$$

$$F_{p2} - F_{p1} = \rho g \frac{d}{dx} (A \bar{h})$$

d) Força lateral

$$F_l = \int_0^h \rho g (d - y) \cdot b \cdot \left. \frac{db}{dx} \right|_{y=y_0} \cdot dx \cdot dy$$

Portanto, as forças de pressão nas áreas de escoamento somadas às forças laterais resultam:

$$F_p = \rho g A \frac{dh}{dx} \cdot dx$$

Para a direção x, as quantidades de movimento são calculadas por:

$$[Taxa \text{ de entrada de quantidade de movimento}] = [\rho Q v]_{entra} = \rho v^2 A$$

$$[Taxa \text{ de saída de quantidade de movimento}] = [\rho Q v]_{sai} = \rho v^2 A + \frac{\partial}{\partial t} (\rho v^2 A) dx$$

$$[Variação\ quantidade\ movimento]_{tempo} = \frac{\partial}{\partial t}(\rho Q)dx$$

Como definido anteriormente:

$$[\Sigma for\c{c}as] = [fluxo\ por\ unid.\ de\ tempo\ da\ qtde\ de\ mov.] + [varia\c{c}o\ qtde\ de\ mov.\ no\ tempo]$$

Portanto,

$$[\Sigma for\c{c}as] = ([Qtde\ mov.]_{sai} - [Qtde\ mov.]_{entra}) + [varia\c{c}o\ qtde\ mov.\ no\ tempo]$$

$$[\Sigma for\c{c}as] = F_g - F_\tau - F_p$$

$$\rho(A \cdot dx)g \cdot S_0 - \rho g(A \cdot dx)S_f - \rho g A \frac{dh}{dx} \cdot dx = \rho v^2 A + \frac{\partial}{\partial t}(\rho v^2 A)dx - \rho v^2 A + \frac{\partial}{\partial t}(\rho Q)dx$$

Simplificando (dx) e como, $v^2 A = \frac{Q^2}{A}$ e a densidade do fluido (ρ) é constante (fluido incompressível), tem-se a segunda equação de Saint-Venant:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{dh}{dx} = gA(S_0 - S_f) \quad \text{Equação 22}$$

Para fluidos não newtonianos a diferença está nas forças de atrito (S_f), justamente pelo fluido não apresentar uma relação linear entre a tensão cisalhante como descrito para a água. Voltando para a

FIGURA 28 nota-se que para o fluido de Bingham (Bingham simplificado), existe uma tensão crítica a ser vencida. Para simular essa tensão, utiliza-se a viscosidade relativa de Coulomb (Johnson & Rodine, 1984 apud Naef et al., 2006; e Johnson, 1970 apud Takahashi, 2007):

$$\tau = \tau_y + \mu_B \frac{\partial u}{\partial y} = \tau_c + \sigma \cdot \tan \phi + \mu_B \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{Equação 23}$$

Sendo:

τ_c = tensões coesivas;

σ = tensão normal no material sólido;

ϕ = ângulo de atrito do material sólido.

Portanto, para um fluido Bingham completo (também conhecido como Herschel-Bulkley), tem-se a seguinte equação apresentada a seguir. Segundo Naef et al. (2006), este modelo é mais adequado para simular o comportamento do material conforme investigações reológicas do lodo do escoamento.

$$\tau = \tau_y + \mu_B \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n = \tau_c + \sigma \cdot \tan \phi + \mu_B \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad \text{Equação 24}$$

Um outro aspecto que deve ser abordado na análise é o regime turbulento. Conforme simulações bem-sucedidas por Jin & Fread (1999) e Rickenmann & Koch (1997) – apud Naef et al. (2006) – pode-se utilizar a resistência turbulenta de Manning-Strickler para simulação de transporte de detritos. Entretanto, este apresenta a desvantagem de não reproduzir o cessar do movimento em superfícies com baixa declividade.

Por último, deve ser considerado o choque entre partículas em escoamento com detritos granulares. Esse aspecto pode ser determinado pela relação dilatante-inercial do cisalhamento dos grãos (TAKAHASHI, 2007). Apesar de ser um aspecto utilizado em *debris-flow*, em uma situação de rompimento de barragem de rejeito, deve existir a interação entre o material carregado.

$$\tau = \varepsilon \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad \text{Equação 25}$$

Sendo o ε função do tamanho do grão, concentração de sólidos, densidade da partícula e ângulo de atrito interno dinâmico. Dessa maneira é possível em uma equação no qual são computados todos esses aspectos para o fluido não newtoniano:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y + \mu_B \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n + \varepsilon \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \\ \tau &= \tau_c + \sigma \cdot \tan \phi + \mu_B \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n + \varepsilon \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \end{aligned} \quad \text{Equação 26}$$

Naef et al. (2006) propõem uma tabela com o termo S_f para um canal retangular. Essas formulações são similares ao que será tratado a seguir para o *software* RiverFlow2D.

QUADRO 3 – TERMO DE RESISTÊNCIA S_f PARA CANAIS RETANGULARES

Descrição	Relação de resistência ao fluxo	Termo de resistência (S_f)
A	Bingham completo	$S_f = \frac{\tau_0}{\rho gh}$ $\tau_0 \text{ pode ser determinado por:}$ $2\tau_0^3 - 3(\tau_y + 2\mu_B q/h^2)\tau_0^2 + \tau_y^3 = 0$
B	Bingham simplificado	$S_f = \frac{\tau_0}{\rho gh}$ $\text{com } \tau_0 = 1,5\tau_y + 3\mu_B q/h^2$
C	Voellmy	$S_f = \frac{n^2 q \sqrt{q^2}}{h^2 C^2 h_r} + \cos \alpha \tan \delta$
D	Turbulento & Coulomb	$S_f = \frac{n^2 q \sqrt{q^2}}{h^2 h_r^{4/3}} + \cos \alpha \tan \delta$
E	Turbulento & Tensão de escoamento	$S_f = \frac{n^2 q \sqrt{q^2}}{h^2 h_r^{4/3}} + \frac{\tau_y}{\rho gh}$
F	Turbulento, Coulomb & Tensão de escoamento	$S_f = \frac{n^2 q \sqrt{q^2}}{h^2 h_r^{4/3}} + \frac{\tau_i}{\rho gh}$ $\text{com } \tau_i = \min(\tau_y; \rho gh \cos \alpha \tan \delta)$
G	Quadrático	$S_f = \frac{n^2 q \sqrt{q^2}}{h^2 h_r^{4/3}} + \frac{\kappa \eta q}{8h^3 \rho g} + \frac{\tau_y}{\rho gh}$
H	Coulomb viscoso	Bingham completo $\text{com } \tau_y = \rho gh \cos \alpha \tan \beta$

FONTE: Naef et al. (2006)

Rocha (2015) afirma que antes da propagação é necessária uma análise da concentração volumétrica (teor de sólidos) no reservatório da barragem. Essa análise avalia se a relação entre o volume de sólidos e o volume total supera 20%, no qual se isso ocorrer, o fluido pode ser considerado como hiperconcentrado (O'BRIEN &

JULIEN, 1985). Essa categorização, conforme a faixa de concentração, serve como um prognóstico para o fluxo, ou seja, ajuda na definição do modelo a ser adotado. O QUADRO 4 mostra o escoamento conforme a concentração volumétrica.

QUADRO 4 – TIPO DE ESCOAMENTO CONFORME A CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA

Características do escoamento	Concentração volumétrica - C_v	Descrição do escoamento
Escorregamento	0,53 a 0,90	Não há escoamento
	0,50 a 0,53	Deformações internas e movimento lento às tensões
Mudflow	0,48 a 0,50	Escoamento evidente, apesar de lento Deformações plásticas sem espraio sobre superfícies adjacentes
	0,45 a 0,48	Mistura-se com facilidade; Apresenta fluidez na deformação alastrando-se sobre superfícies horizontais; Durante movimento a superfície do fluido apresenta considerável declividade; Aparecimento de ondas com dissipação rápida.
Mud flood	0,40 a 0,45	Mistura-se com facilidade; Apresenta fluidez na deformação alastrando-se sobre superfícies horizontais; Durante movimento a superfície do fluido apresenta considerável declividade; Aparecimento de ondas com dissipação rápida.
	0,35 a 0,40	Acentuada sedimentação; Alastra-se quase por completo sobre superfícies horizontais; Identificação de duas fases (fase líquida aparece); Ondas se propagam por distâncias consideráveis.
	0,30 a 0,35	Separação de água; Ondas propagam-se com facilidade; Decantação de partículas granulares.
	0,20 a 0,30	Ação de ondas distinta; Superfície fluida; Todas as partículas foram decantadas.
Escoamento aquoso	< 0,20	Inundação provocada por propagação de onda no estado líquido com descarga de sedimentos suspensos

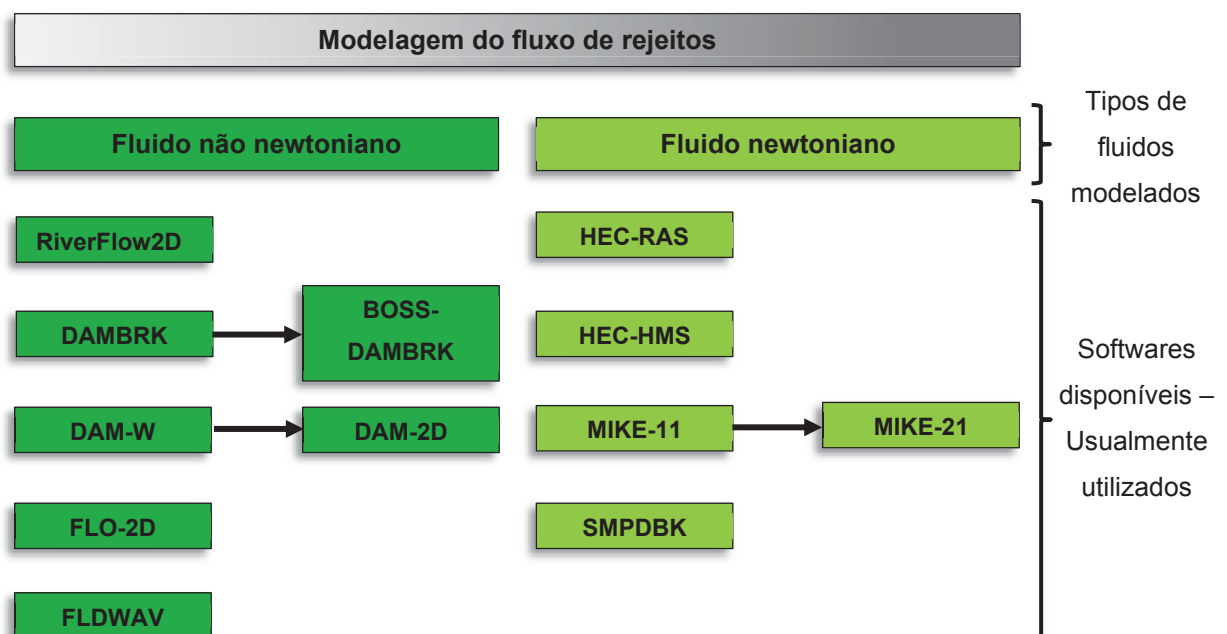
FONTE: Adaptado de O'Brien e Julien (1985) apud Machado (2017)

O'Brien e Julien (1985) sugerem que o escoamento com C_v abaixo de 20% são essencialmente aquosos. A corrida de lama (*Mud Flood*) possui maior viscosidade e densidade, variando sua concentração volumétrica entre 20% e 45%. Para a lama plástica (*Mudflow*), o C_v fica no intervalo de 45% a 55%, isso resulta em uma alta viscosidade, que resulta numa baixa velocidade, mais lenta que o *Mud flood*.

USGS (2005) apud Machado (2017) observa que o tipo de fluxo se distribuiu de forma contínua, sendo os limites entre eles pouco nítidos ou bem definidos. É ressaltado que um único evento pode produzir diferentes tipos de fluxo em momentos e locais diferentes ao longo do curso de água.

Existem na literatura modelos – uni, bi ou tridimensionais – capazes de simular esses diferentes tipos de escoamento, conforme a FIGURA 32. Nota-se que nem todos são compatíveis com a análise de modelos com escoamento não-newtoniano, por isso cabe ao usuário escolher o modelo adequado, com base na simulação que desse ser feita.

FIGURA 32 – MODELOS DE FLUIDOS E RESPECTIVOS SOFTWARES



FONTE Adaptado e traduzido USSD (2013) apud Machado (2017)

Segundo Hydronia LLC (2018), no *software* RiverFlow2D algumas tensões são consideradas para cobrir todas as condições de escoamento de sedimento e lama, incluindo:

- Tensão turbulenta (*Turbulent stress*), τ_t ;
- Tensão dispersiva (*Dispersive stress*), τ_d ;
- Tensão friccional tipo Coulomb (*Coulomb-type frictional stress*), τ_f ;
- Tensão de escoamento (*Yield stress*), τ_y ; e
- Tensão viscosa (*Viscous stress*), τ_μ .

As equações que descrevem as forças tangenciais geradas pelas tensões envolvem a tensão turbulenta (τ_t), tensão dispersiva (τ_d), tensão friccional tipo Coulomb (τ_f), tensão de escoamento (τ_y) e tensão viscosa (τ_μ). Segundo Hydronia LLC (2018), empresa que desenvolveu o software utilizado nas modelagens (RiverFlow 2D), nem todas as tensões agem simultaneamente na mesma localidade, entretanto todas podem coexistir e são matematicamente agrupadas na mesma fórmula. Para o caso de um fluido newtoniano, as tensões do leito são expressas como uma função da velocidade média u e a profundidade h como:

$$\tau_b = 3\tau_\mu \text{ com } \tau_\mu = \frac{u}{h} \quad \text{Equação 27}$$

Um fluido de Bingham não vai escoar até um certo valor de tensão (tensão de escoamento, τ_y) ser alcançado. Uma vez fluindo, o movimento é caracterizado como uma viscosidade plástica da mistura. As tensões do leito τ_b podem ser obtidas através da formulação cúbica:

$$2\tau_b^3 - 3(\tau_y + 2\tau_\mu)\tau_b^2 + \tau_y^3 = 0 \quad \text{Equação 28}$$

e para os casos com a relação de tensões τ_y/τ_b menor que 0,5, pode ser reduzido para

$$\tau_b = \frac{3}{2}\tau_y + 3\tau_\mu \quad \text{Equação 29}$$

Se somente a tensão friccional tipo Coulomb for considerada, a tensão do leito fica

$$\tau_b = \tau_f = g\rho h \cdot \cos\theta \cdot \tan\theta_b \quad \text{Equação 30}$$

No qual θ é o ângulo da declividade do leito e θ_b é o ângulo de atrito do material sólido. Nota-se que essa equação representa o cálculo da tensão cisalhante no solo (envoltória de ruptura), sem a parcela de coesão, multiplicado pela declividade do canal, conforme descrito a seguir. Essa representação ajuda a mostrar que apesar de ser apresentado usualmente com símbolos diferentes, é aplicação da teoria geotécnica sobre esse tipo de tensão, conforme ilustra Johnson (1970) apud Takahashi (2007):

$g\rho = \gamma \rightarrow$ peso específico do material (solo);

$\gamma h = \sigma_v \rightarrow$ tensão vertical no material;

$\theta_b = \phi \rightarrow$ ângulo de atrito do material;

$\tau_f = g\rho h \cdot \cos\theta \cdot \tan\theta_b = \sigma_v \cdot \tan\phi \cdot \cos\theta$.

Se τ_b somente incluir efeitos dispersivos e turbulentos perto do leito, um coeficiente c_f pode ser usado

$$\tau_b = \tau_t = \rho c_f u^2 \quad \text{Equação 31}$$

Em geral, o total de tensão cisalhante τ_b pode ser escrito como a combinação das tensões componentes:

$$\tau_b = f(\tau_t, \tau_d, \tau_y, \tau_\mu, \tau_f) \quad \text{Equação 32}$$

O QUADRO 5 mostra as propriedades reológicas friccionalis disponíveis no RiverFlow2D. Relações do tipo Bingham incluem a seguinte formulação cúbica padrão

$$f(\tau_0, \tau_y) = 2\tau_0^3 - 3(\tau_y + 2\tau_\mu)\tau_0^2 + \tau_y^3 = 0 \quad \text{Equação 33}$$

A formulação quadrática no QUADRO 5 incluem os termos turbulento-colisional, tensão de escoamento e resistência ao fluxo laminar em uma lei reológica quadrática, onde o valor padrão de $k = 24$ é assumido.

QUADRO 5 – FORMULAÇÕES E RESPECTIVOS PARÂMETROS DE ENTRADA

Formulação	Termo de resistência	Parâmetros de entrada
Turbulento	$\tau_b = \tau_t$	Coeficiente de Manning (n)
Bingham completo	$\tau_b = \tau_0 \text{ com } f(\tau_0, \tau_y) = 0$	Viscosidade de Bingham, Tensão de escoamento, Densidade
Bingham simplificado	$\tau_b = 1,5\tau_y + 3\tau_\mu$	Viscosidade de Bingham, Tensão de escoamento, Densidade
Turbulento e Coulomb	$\tau_b = \tau_t + \tau_f$	Coeficiente de Manning (n), Ângulo de atrito, Densidade
Turbulento e tensão inicial de escoamento	$\tau_b = \tau_t + \tau_y$	Coeficiente de Manning (n), Tensão de escoamento
Turbulento, Coulomb e tensão inicial de escoamento	$\tau_b = \tau_t + \min(\tau_y; \tau_f)$	Coeficiente de Manning (n), Tensão de escoamento, Ângulo de atrito, Densidade
Quadrático	$\tau_b = \tau_t + \tau_y + \frac{k}{8}\tau_\mu$	Coeficiente de Manning (n), Tensão de escoamento, Ângulo de atrito, Densidade
Granular	$\tau_b = \tau_f$	Ângulo de atrito (deslizamento de talude)

FONTE: Hydronia LLC (2018)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do estudo foram necessárias duas caracterizações, a primeira é com relação ao solo utilizado para reproduzir o rejeito e também o seu comportamento de fluido não newtoniano quando adicionado água. Os ensaios para caracterizar o solo foram feitos no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) na Universidade Federal do Paraná (UFPR), na parte de geotecnia. Foram realizados ensaios para obter a curva granulométrica (peneiramento e sedimentação), Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP), densidade dos grãos e teor de umidade. Os ensaios do material com propriedades reológicas foram feitos no Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos (CEPPA) da UFPR, utilizando o reômetro deste laboratório. O solo utilizado foi natural da região de Londrina/PR, devido a facilidade de acesso e homogeneização da amostra para os ensaios reológicos. Além disso, foi disponibilizado pela UFPR uma amostra do solo de Brumadinho/MG para as análises.

3.1 CARACATRIZAÇÃO DO SOLO

Para esta etapa, iniciou-se com os ensaios de densidade dos grãos (FIGURA 33), segundo a NBR 6457 e DNER-ME 93, cujo resultado é utilizado na curva granulométrica. Para este teste foram feitas duas amostras com 2 ensaios cada. No entanto, a diferença nos resultados levou a ser realizado um terceiro, o qual gerou um resultado satisfatório. Os valores gerados são apresentados na TABELA 4, no qual a média da densidade relativa dos grãos foi de 2,97.

FIGURA 33 – ENSAIO DE DENSIDADE DOS GRÃOS



FONTE: O autor (2019)

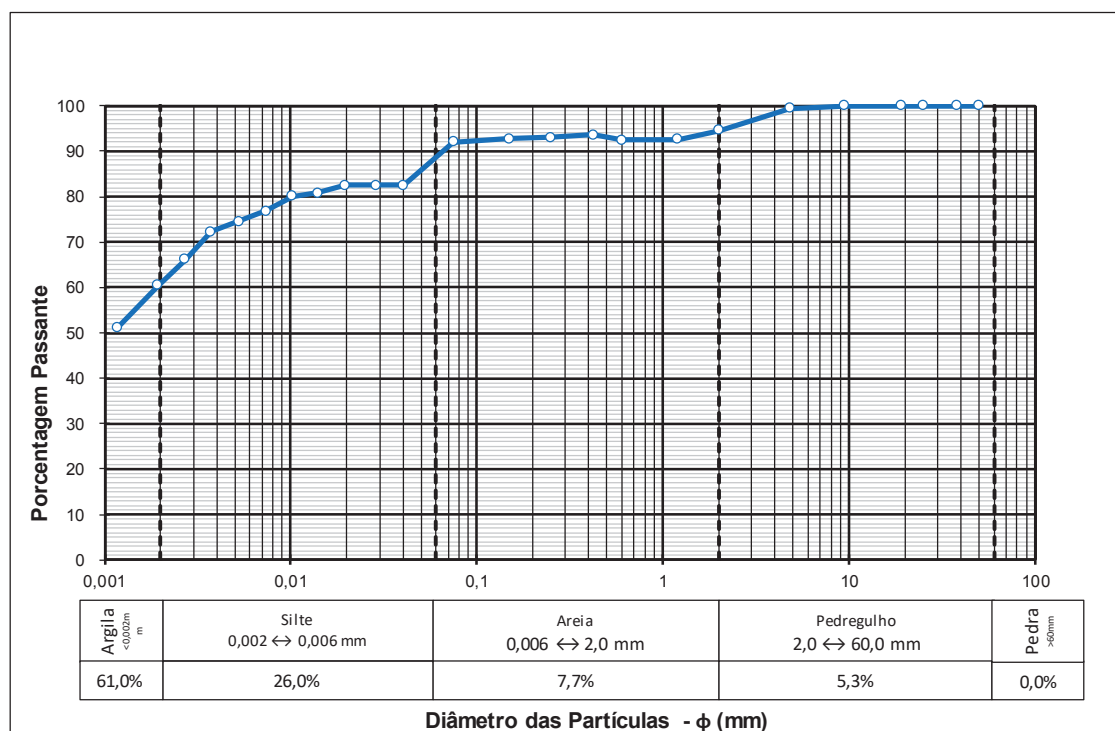
TABELA 4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DENSIDADE DOS GRÃOS

# Cap.	Massa picnômetro (g)	Massa picnômetro + solo (g)	Massa picnômetro + solo + água (g)	Massa picnômetro + água (g)	G _t	G ₂₀
4	37,99	57,43	117,75	104,85	2,97	2,97
15	28,62	46,09	100,06	88,46	2,98	2,98
4	41,18	65,78	123,60	107,16	3,01	3,02
15	37,92	48,34	111,55	104,71	2,91	2,91

FONTE: O autor (2019)

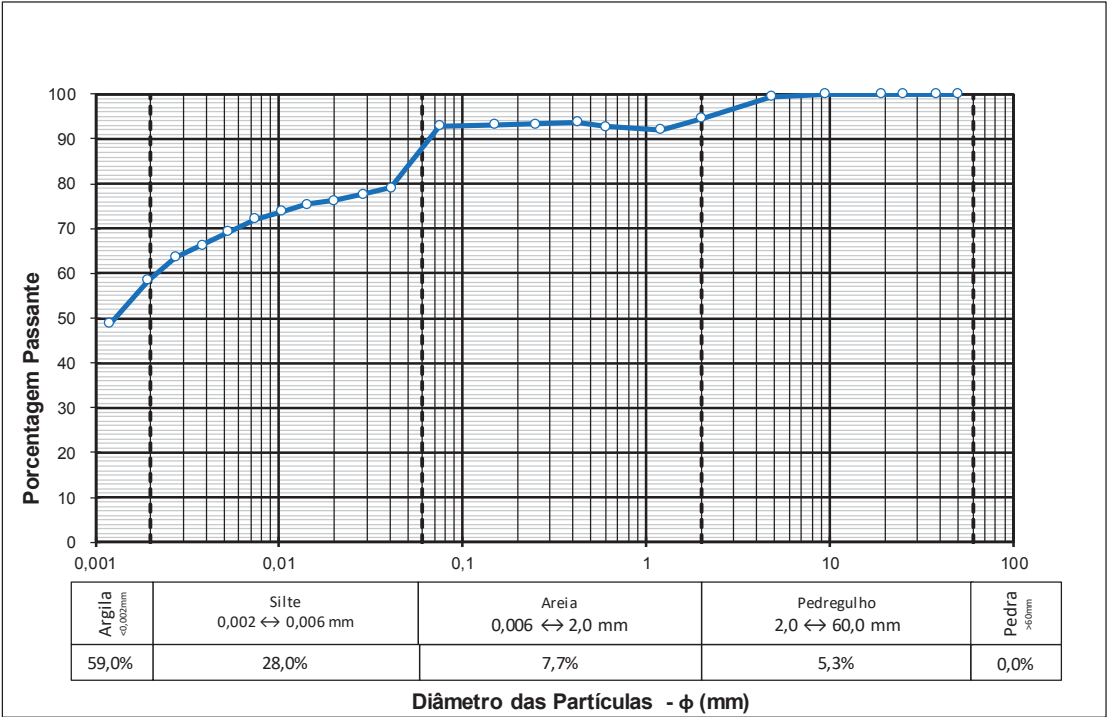
Para a curva granulométrica foi realizado peneiramento (grosso e fino) e sedimentação com utilização de defloculante (hexametáfosfato de sódio). Assim obteve-se o percentual de partículas predominante no solo utilizado. Foram realizados 3 ensaios conforme a NBR 7181:2016, no qual notou-se que a material apresenta maior teor de finos em sua composição. Originalmente seriam 4 amostras, no entanto, em virtude de um copo de dispersão estar danificado, uma amostra foi comprometida. Os resultados são apresentados da FIGURA 34 a FIGURA 36:

FIGURA 34 – CURVA GRANULOMÉTRICA AMOSTRA 1 – ENSAIO 1



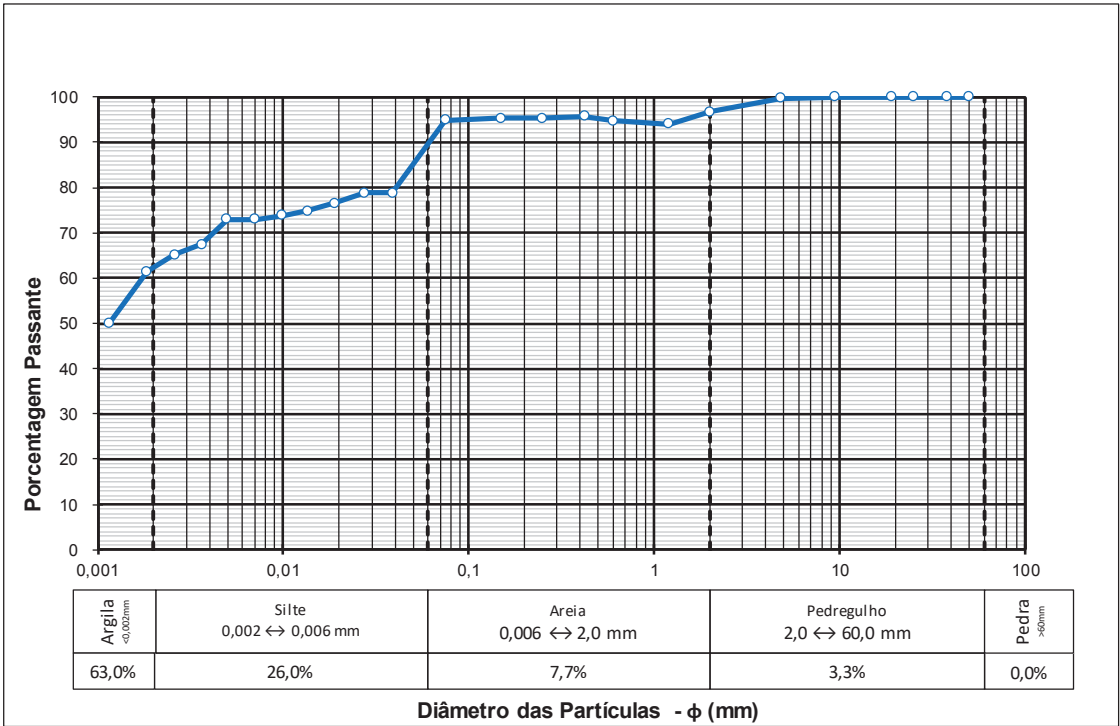
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 35 – CURVA GRANULOMÉTRICA AMOSTRA 1 – ENSAIO 2



FONTE: O autor (2019)

FIGURA 36 – CURVA GRANULOMÉTRICA AMOSTRA 2 – ENSAIO 2

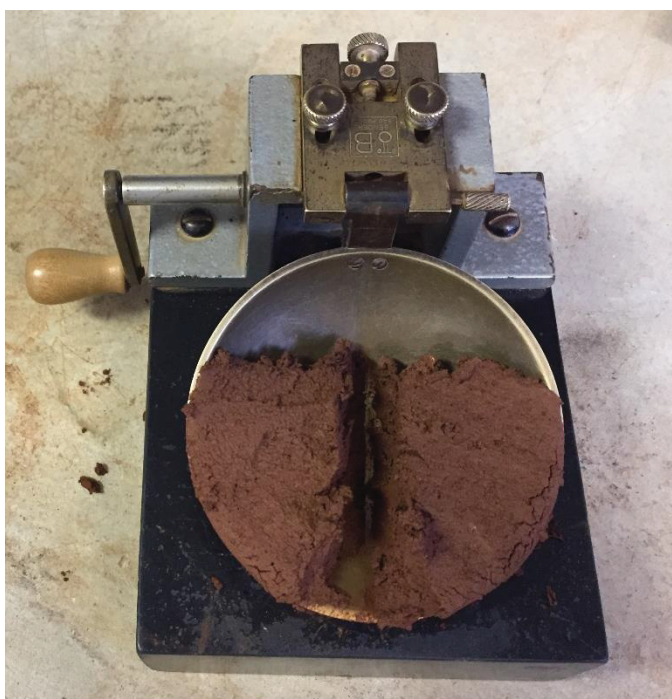


FONTE: O autor (2019)

Por esses resultados, conclui-se que em média o material possui 61,0% de argila, 26,7% de silte, 7,7% de areia, 4,6% de pedregulho, 0,0% de pedra.

Em seguida foram feitos testes para o limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). Para o LL utilizou-se um aparelho de Casagrande manual (FIGURA 37). O valor médio obtido para o LL foi de 46,35%. A seguir, os resultados são apresentados nos QUADRO 6 e QUADRO 7.

FIGURA 37 – REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE LIMITE DE LIQUIDEZ



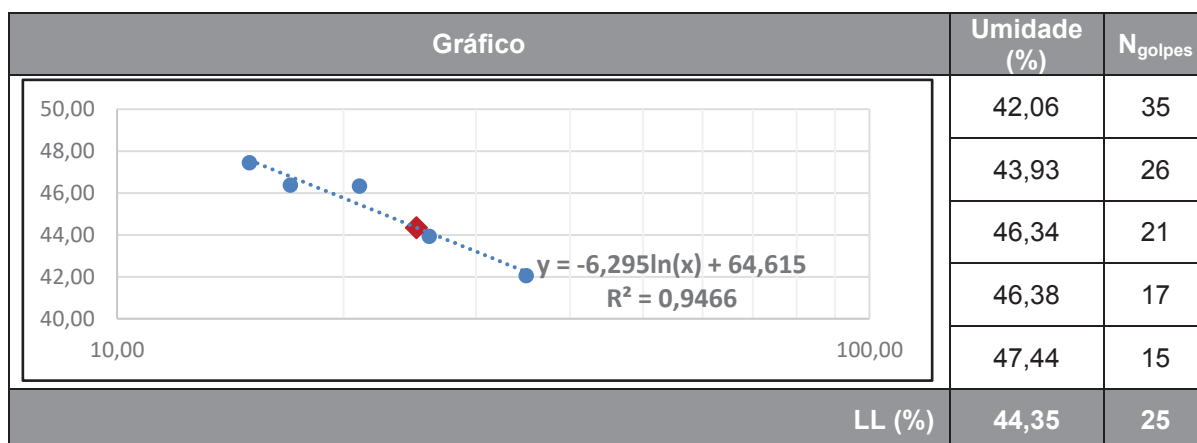
FONTE: O autor (2019)

QUADRO 6 – RESULTADOS PARA O LIMITE DE LIQUIDEZ – AMOSTRA 1

Gráfico	Umidade (%)	N _{golpes}
	43,08	35
	45,74	27
	47,43	31
	50,82	18
	55,76	17
LL (%)	48,34	25

FONTE: O autor (2019)

QUADRO 7 – RESULTADOS PARA O LIMITE DE LIQUIDEZ – AMOSTRA 2



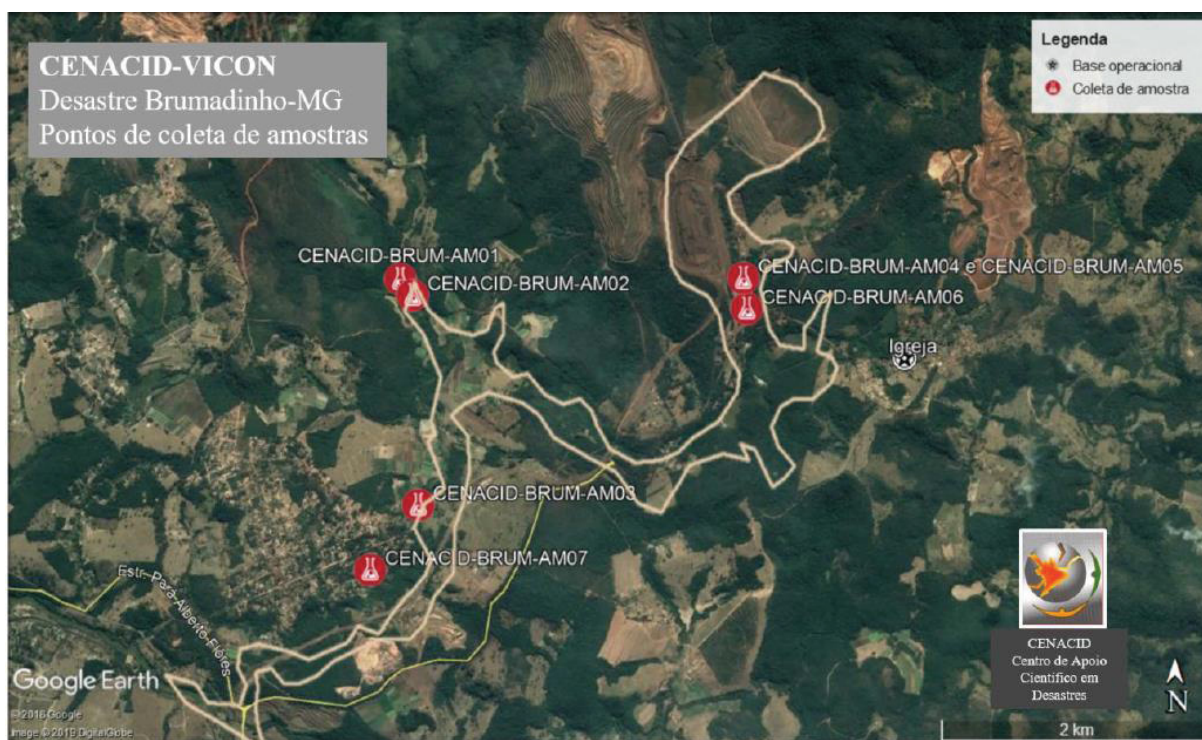
FONTE: O autor (2019)

Para o LP os valores obtidos foram de 38% para a amostra 1 e 40% para a amostra 2, ou seja, um valor médio de 39% (mais informações podem ser observadas nos apêndices 1 a 4). Com posse desses resultados calculou-se o Índice de Plasticidade (IP), este a diferença entre o LL e LP ($IP = LL - LP$), que para valores médios foi de 7,35%.

Analisando o gráfico de Seed et al. (FIGURA 24), nota-se que o material se localiza em uma zona B. Nesta é necessário testar se a umidade é maior que 85% do limite de liquidez, ou seja, um valor de 39,39%. Notou-se que pela média das umidades registradas que o material não atingia esse valor. Portanto, o solo não é suscetível a liquefação. Devido a indisponibilidade de outro tipo de material, no qual se pudesse realizar esses ensaios, foi utilizado este solo predominantemente argiloso nas observações deste trabalho.

Outra amostra utilizada para as análises foi coletada e disponibilizada pelo CENACID (Centro de Apoio Científico em Desastre) da UFPR após o desastre da barragem B-I em Brumadinho/MG. Foi a amostra de número 7 da coleta, escolhida por ainda possuir quantidade considerável de material, que permitiria as determinações necessárias. A FIGURA 38 mostra o local de coleta em campo.

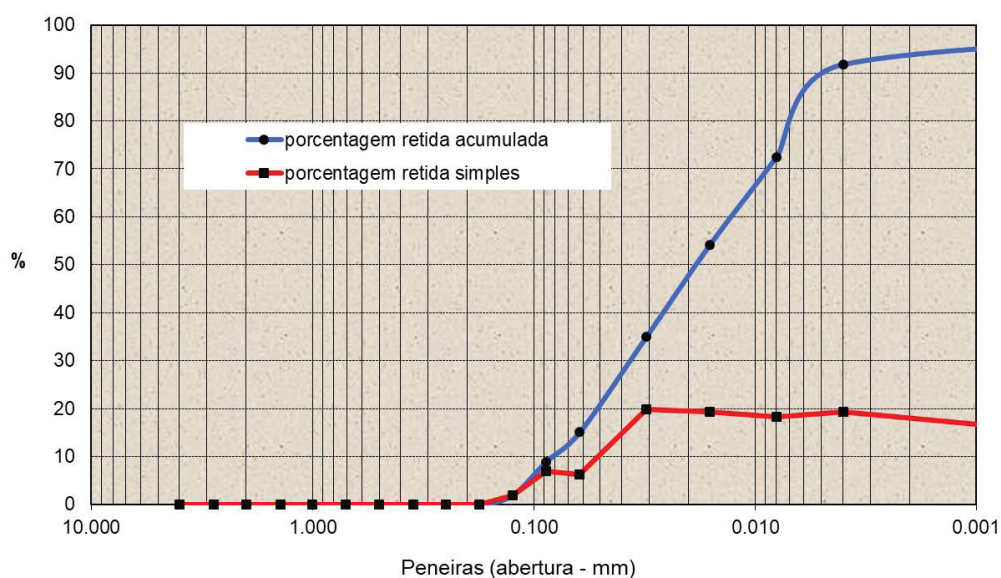
FIGURA 38 – LOCALIZAÇÃO DA AMOSTRA N° 7 DA COLETA EM BRUMADINHO



FONTE: CENACID (2019)

A granulometria foi realizada pelo Laboratório de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar (LabESed) da própria universidade, e a amostra apresenta a granulometria apresentada na FIGURA 39:

FIGURA 39 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL COLETADO EM BRUMADINHO



FONTE: LabESed – UFPR (2019)

Nota-se pela curva que o material é predominantemente siltoso, com uma pequena parcela de areia. Percentuais de cada fração são apresentados na TABELA 5:




TABELA 5 – PERCENTUAL DE CADA FRAÇÃO DO SOLO PARA A AMOSTRA COLETADA

Argila	Silte	Areia
8,17%	76,74%	15,09%

FONTE: Adaptado LabESed – UFPR (2019)

Comparando com as amostras anteriores, existe uma diferença de granulometria, no qual a predominância de um é argila (Londrina/PR) e outro é o silte (rejeito Brumadinho/MG). Também foi realizado na amostra o ensaio de densidade dos grãos, este foi realizado no LAME apresentou o resultado apresentado na FIGURA 40.

FIGURA 40 – DENSIDADE DOS GRÃOS PARA A AMOSTRA DA BARRAGEM B-I (BRUMADINHO)

		DENSIDADE DOS GRÃOS				 	
IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: <u>Amostra 1</u>							
DATA DO ENSAIO: <u>13/12/2019</u>							
EXECUTADO POR: <u>Cezar Falavigna Siva</u>							
TEMPERATURA (°C): <u>21</u>							
#	Massa picnômetro (g)	Massa picnômetro + solo (g)	Massa picnômetro + solo + água (g)	Massa picnômetro + água (g)	D _t	D ₂₀	
15	36,94	58,40	118,77	102,99	3,78	3,7794	
4	38,00	51,89	115,34	105,22	3,68	3,6836	
13	29,03	40,63	97,54	89,09	3,68	3,68	
Densidade dos grãos:						3,7149	

FONTE: O autor (2019)

Nota-se que o material possui uma densidade relativa muito superior ao material argiloso de Londrina/PR, 2,97 contra 3,715 do rejeito. Pelo relatório técnico de Robertson et al. (2019), o material predominante na barragem apresenta uma densidade dos grãos de 4,90 para os rejeitos, 4,00 para a lama, já o solo residual presente na região apresenta um valor de 2,75. Dessa forma, nota-se que a amostra coletada apresenta uma mistura dos materiais da região.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO FLUIDO NÃO NEWTONIANO

Em virtude dos equipamentos disponíveis no Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos (CEPPA), as concentrações foram estabelecidas conforme critérios de bibliografia. No caso, o CEPPA possui um reômetro do tipo rotacional com cilindro concêntrico ou com palheta coaxial (mais usualmente conhecido como vane).

Primeiramente, a rotação que deve ser utilizada deve ser baixa, Dzuy e Boger (1983) testaram várias velocidades e concluíram que essa deve ser entre 0,1 a 8 RPM (rotações por minuto), porém nesse mesmo estudo os próprios autores utilizam a menor velocidade possível nas demais análises, ou seja, 0,1 RPM, este adotado para os ensaios neste estudo.

Outra questão é saber qual dos *spindles* usar. A aplicação de cada um varia conforme a concentração volumétrica (C_v) no material estudado. De acordo com Machado (2017), a faixa que a autora conseguiu utilizar o vane com resultados satisfatórios possui concentrações entre 46% e 55% ($46\% < C_v < 55\%$), já na faixa de 35% a 42%, foi utilizado o cilindro concêntrico ($35\% < C_v < 42\%$).

Para estabelecer proporção de material usado nos ensaios, foi realizado a seguinte avaliação com as relações de índices físicos do solo.

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{P_s/V_s}{P_w/V_w} \quad \text{Equação 34}$$

Rearranjando,

$$V_s = \frac{P_s}{G \cdot \gamma_w} \quad \text{Equação 35}$$

Sendo:

G – Densidade dos grãos (adimensional);

γ_s – peso específico dos sólidos (KN/m³ ou g/mL);

γ_w – peso específico da água (KN/m³ ou g/mL);

P_s – peso do material sólido (KN ou g);

V_s – volume de material sólido (KN ou g);

P_w – peso da água (m³ ou mL);

V_w – volume de água (m³ ou mL).

Como,

$$C_V = \frac{V_s}{V_T} \therefore V_s = C_V \cdot V_T \quad \text{Equação 36}$$

Sendo:

C_V – concentração volumétrica (%);

V_s – volume de sólidos (m³ ou mL);

V_T – volume total (sólidos + água) (m³ ou mL).

Aplicando a equação (35) em (34):

$$C_V \cdot V_T = \frac{P_s}{G \cdot \gamma_w} \quad \text{Equação 37}$$

Isolando o volume total, tem-se a Equação 38, na qual é possível saber o volume o total de material para a concentração volumétrica desejada:

$$V_T = \frac{P_s}{G \cdot \gamma_w \cdot C_V} \quad \text{Equação 38}$$

Outra relação que pode ser usada é a concentração de sedimentos por peso (C_w), apresentando na Equação 39, conforme Melo (2014):

$$C_w = \frac{C_v \cdot \gamma_s}{\gamma_w + C_v(\gamma_s - \gamma_w)} = \frac{C_v \cdot G}{1 + C_v(G - 1)} \quad \text{Equação 39}$$

A concentração volumétrica possui definição similar ao teor de sólidos, sendo que este termo é mais usado na engenharia geotécnica. A diferença é que o teor de sólidos é referente a massa de sólidos sobre a massa total.

3.2.1 Ensaios reométricos

O ensaio com o reômetro foi realizado no CEPPA da UFPR, onde a amostra do solo argiloso foi preparada somente usando o material passante na peneira com abertura de 0,42 mm. Esta foi escolhida pois, para os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, somente os grãos passantes são utilizados na análise. Portanto, para existir uma coerência entre os ensaios, utilizou-se essa peneira. Já para a amostra de material siltoso não foi passada em nenhuma peneira, sendo todo seu conteúdo utilizado para o ensaio de reologia. Em ambos foram usadas as mesmas concentrações volumétricas, para existir uma coerência nas comparações.

Com isso foi utilizada a Equação 39 para estabelecer as quantidades de água para cada concentração volumétrica e também o tipo de *spindle* utilizado conforme descrito anteriormente, apresentados na QUADRO 8.

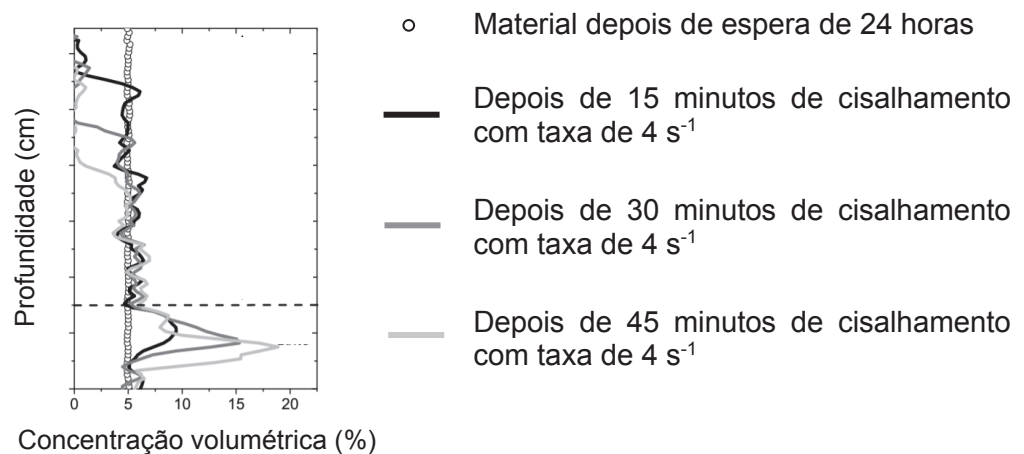
QUADRO 8 – QUANTIDADE DE ÁGUA PARA CADA ENSAIO

#	Água			Solo			Utilizados ensaio reômetro				
	P _{recip.} (g)	P _{recip + água} (g)	P _w (g)	P _{recip.} (g)	P _{recip. + solo} (g)	P _s (g)	Cv	Spindle	Cw	P _s (g)	P _w (g)
1	175.76	332.1	156.34	183.32	433.34	250.02	35%	Cilindro Concêntrico	61.53%	250.02	156.34
2	176.31	336.42	160.11	181.7	437.76	256.06	35%	Cilindro Concêntrico	61.53%	256.06	160.11
3	176.29	302.54	126.25	182.4	432.38	249.98	40%	Vane	66.44%	249.98	126.25
4	176.36	302.63	126.27	181.6	431.61	250.01	40%	Vane	66.44%	250.01	126.27
5	176.53	316.82	140.29	180.63	430.63	250	37.5%	Cilindro Concêntrico	64.05%	250	140.29
6	176.7	317.01	140.31	180.15	430.18	250.03	38%	Cilindro Concêntrico	64.05%	250.03	140.31
BRU	181.2	328.9	147.7	101.14	337.35	236.21	35%	Cilindro Concêntrico	61.53%	236.21	147.7
BRU	178.92	298.22	119.3	101.14	337.35	236.21	40%	Cilindro Concêntrico	66.44%	236.21	119.3

FONTE: O autor (2019)

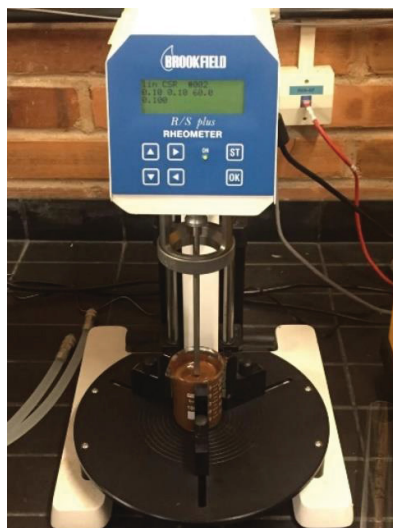
Cabe destacar que nas análises não foi utilizado a variação da concentração volumétrica conforme a profundidade, como aponta Ovarlez et al. (2012). Por conta da decantação dos sedimentos, um fluido vai possuir várias camadas com concentrações volumétricas diferentes, como aponta a FIGURA 41. Porém, neste estudo e ensaios, o fluido foi considerado homogêneo. Nota-se na imagem que os pontos brancos, onde existe a estabilidade, são referentes à espera de 24 horas para realizar os ensaios. Entretanto, em um cenário de ruptura de barragens, essa situação seria irreal, visto que o material é liberado instantaneamente. Mas nota-se que conforme o passar do tempo e cisalhamento, o material decanta e suas concentrações volumétricas se alteram.

FIGURA 41 – VARIAÇÃO DO CV(%) COM A PROFUNDIDADE, TEMPO E CISALHAMENTO



FONTE: Adaptado Ovarlez (2012)

FIGURA 42 – ENSAIO REOLÓGICO UTILIZANDO A PALHETA COAXIAL (VANE)

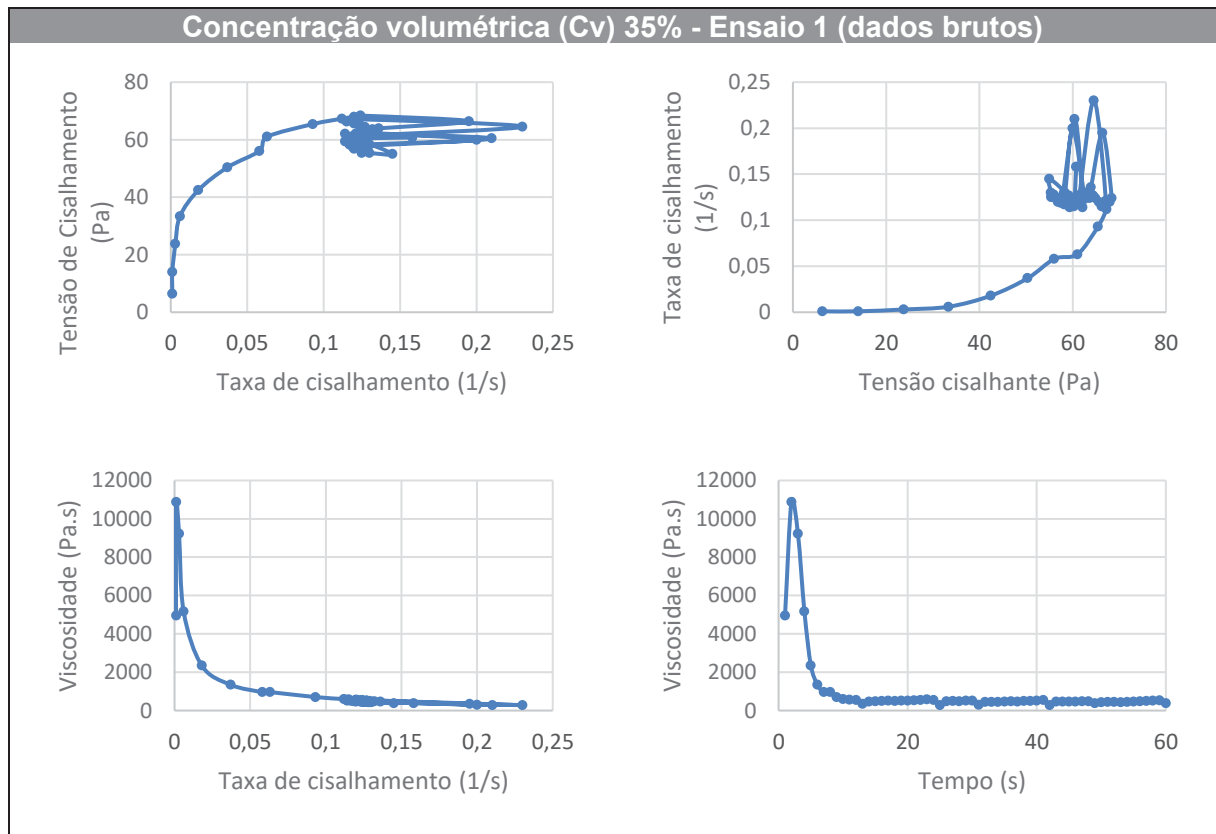


FONTE: O autor (2019)

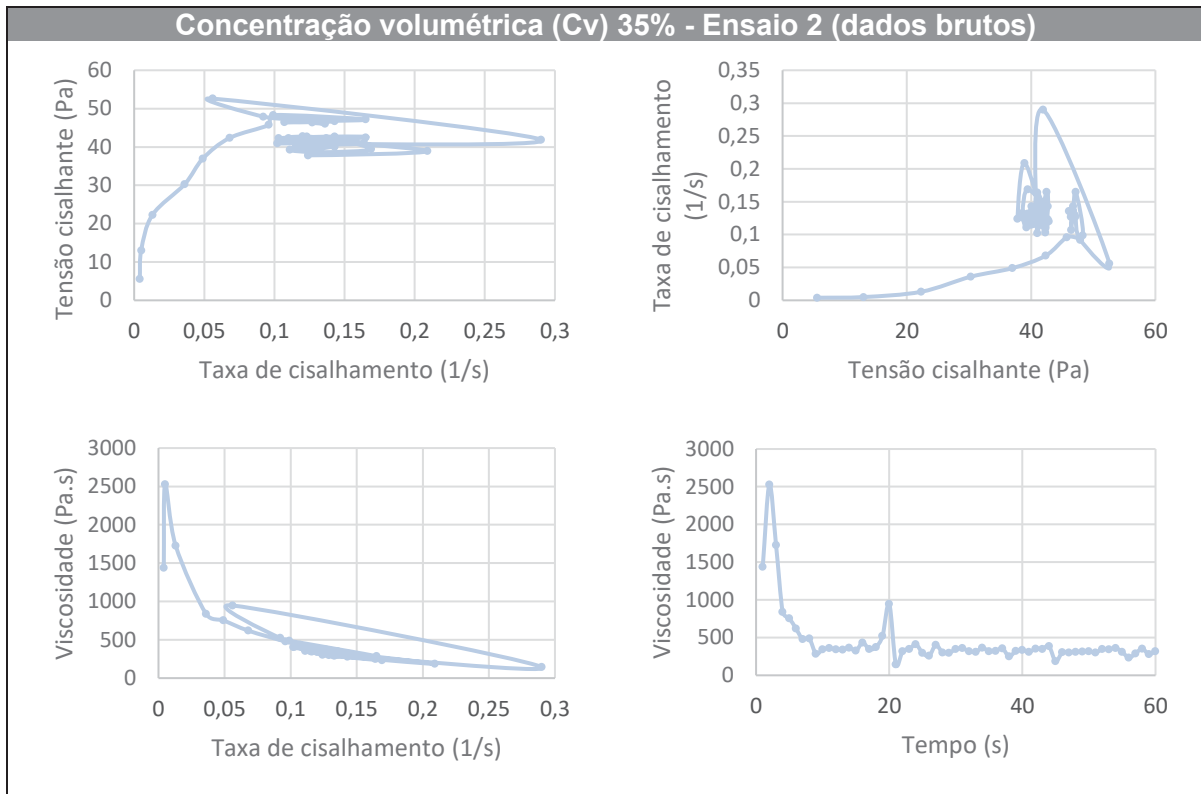
Outro ponto não considerado nas análises é a tixotropia do material, foi considerado ele somente como um fluido, não apresentando outro estado durante as análises. Além disso, o cisalhamento do material somente no sentido de rotação do *spindle*, não abrangendo outras direções.

Para cada amostra era realizado um ensaio, entretanto, na segunda amostra o ensaio sempre era feito duas vezes, ou seja, era feitas três análises, uma na primeira amostra do par, outra na segunda amostra e uma terceira análise novamente na segunda amostra do par. Os resultados obtidos para concentração volumétrica de 35% são ilustrados a seguir (QUADRO 9 ao QUADRO 11), no qual são apresentados os resultados brutos, sem análise dos *outliers*.

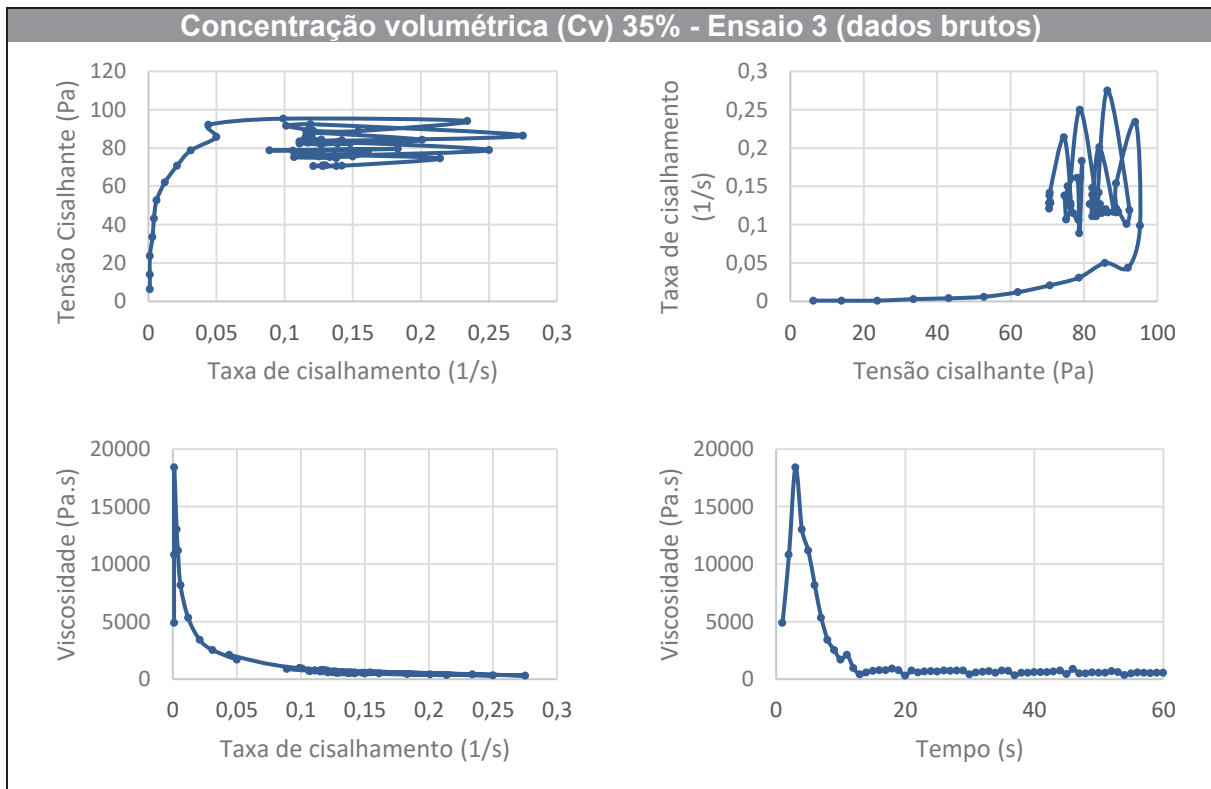
QUADRO 9 – RESULTADOS REOMÉTRICOS OBTIDOS PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 35%



FONTE: O autor (2019)

QUADRO 10 – RESULTADOS REOMÉTRICOS OBTIDOS PARA O ENSAIO 2 COM C_v DE 35%

FONTE: O autor (2019)

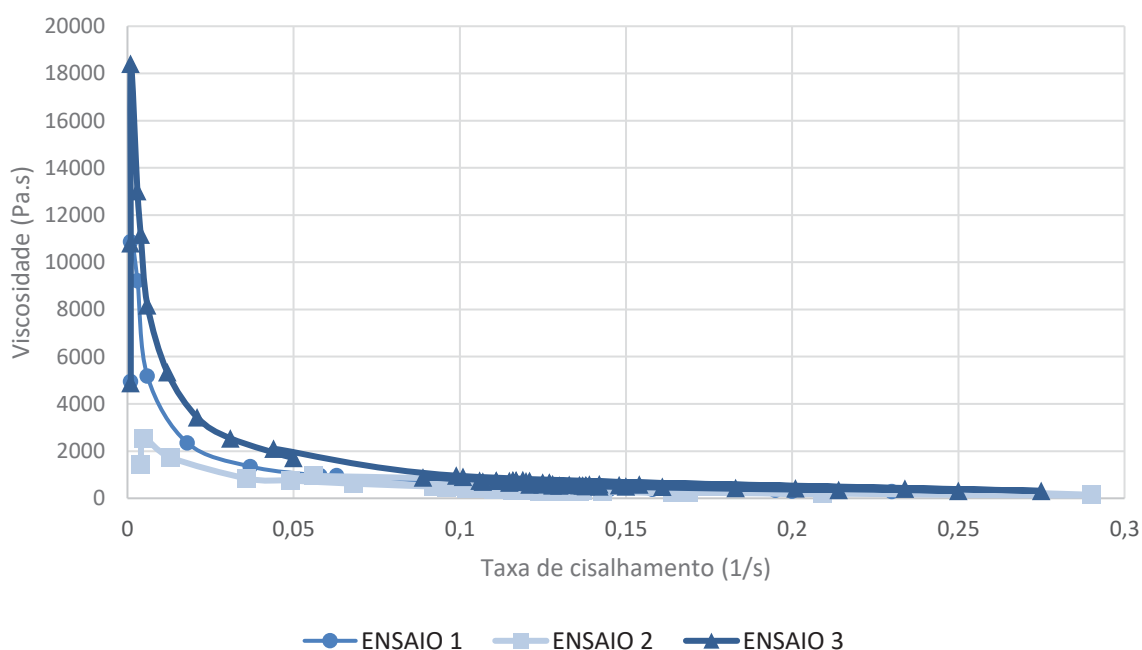
QUADRO 11 – RESULTADOS REOMÉTRICOS OBTIDOS PARA O ENSAIO 3 COM C_v DE 35%

FONTE: O autor (2019)

Nota-se que alguns pontos não estão satisfatórios. Isso acontece devido o material não ser perfeitamente homogêneo. Por mais que exista o esforço tanto na preparação da amostra, quanto na sua realização, durante o teste é inevitável que o material sedimente, ou mesmo quando o *spindle* era introduzido no material este gera alterações para acomodar seu volume).

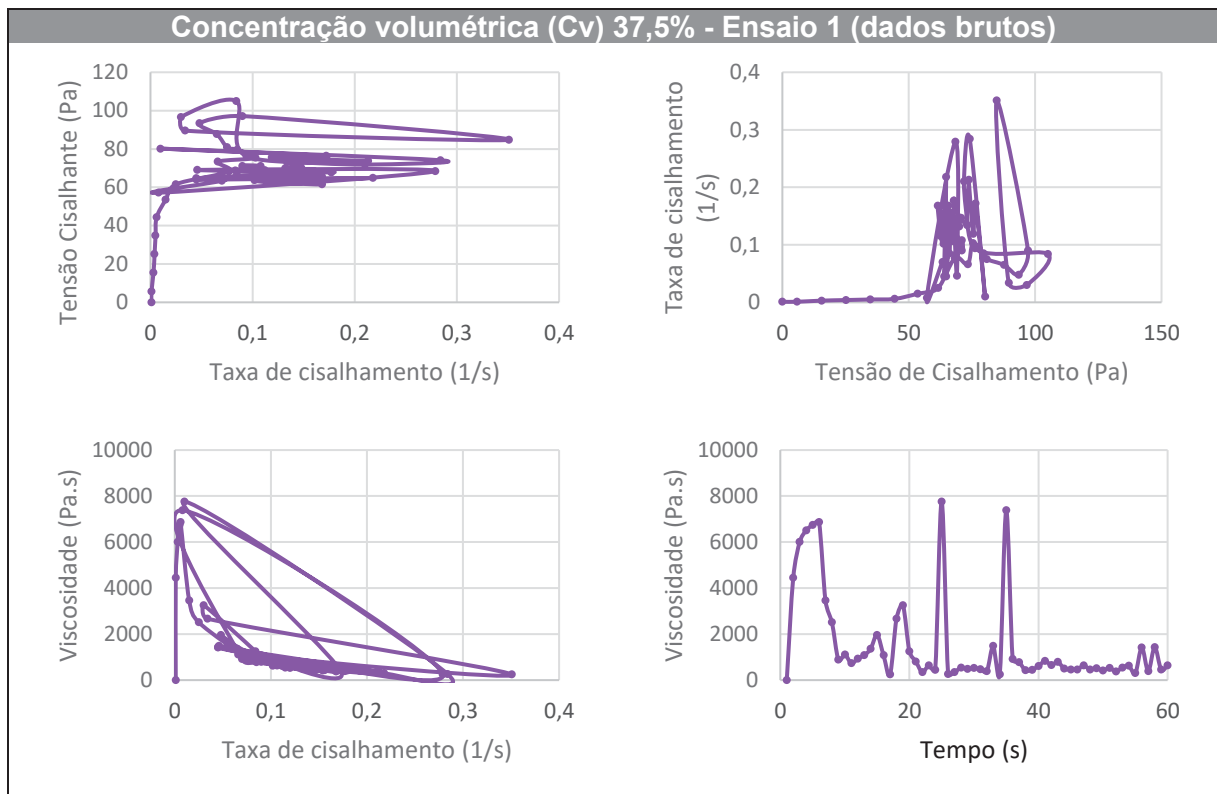
No GRÁFICO 1, a seguir, as curvas de viscosidade para os três ensaios são comparadas. Observe que o ensaio 2 não obteve bons resultados quando comparado aos outros, isso pode ter ocorrido por diversos motivos, porém como os valores não estão satisfatórios, esse teste foi descartado. Sendo assim próximas análises, para CV de 35%, foram realizadas somente com os ensaios 1 e 3.

GRÁFICO 1 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE ENSAIO PARA C_v DE 35%

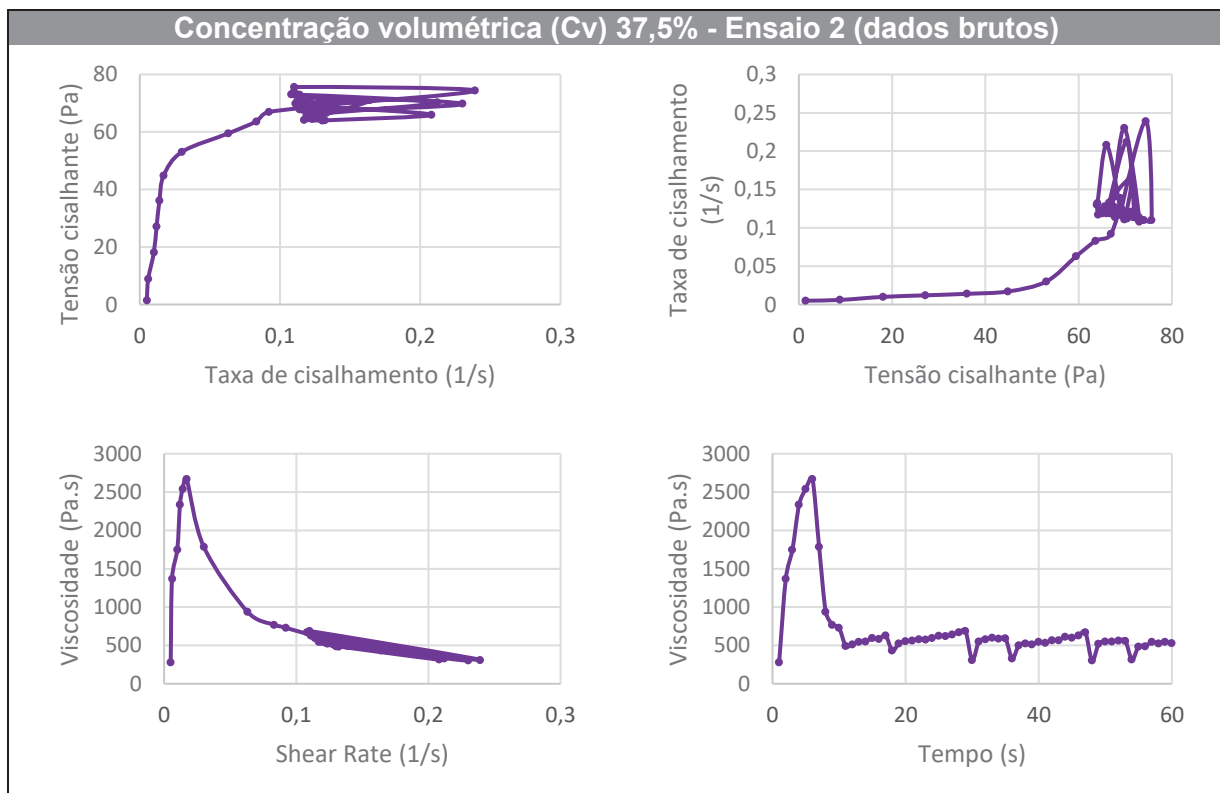


FONTE: O autor (2019)

O mesmo processo foi feito para a concentração de 37,5%, no qual foram realizados somente dois ensaios devido ao fato do *spindle* não conseguir girar corretamente, isso em virtude da amostra não estar com a quantidade de água para o uso deste. O *vane* também não seria adequado por estar em um estado muito líquido para ser utilizado. Os resultados são ilustrados pelo QUADRO 12 (ensaio 1) e QUADRO 13 (ensaio 2):

QUADRO 12 – DADOS DO REÔMETRO PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 37,5%

FONTE: O autor (2019)

QUADRO 13 – DADOS DO REÔMETRO PARA O ENSAIO 2 COM C_v DE 37,5%

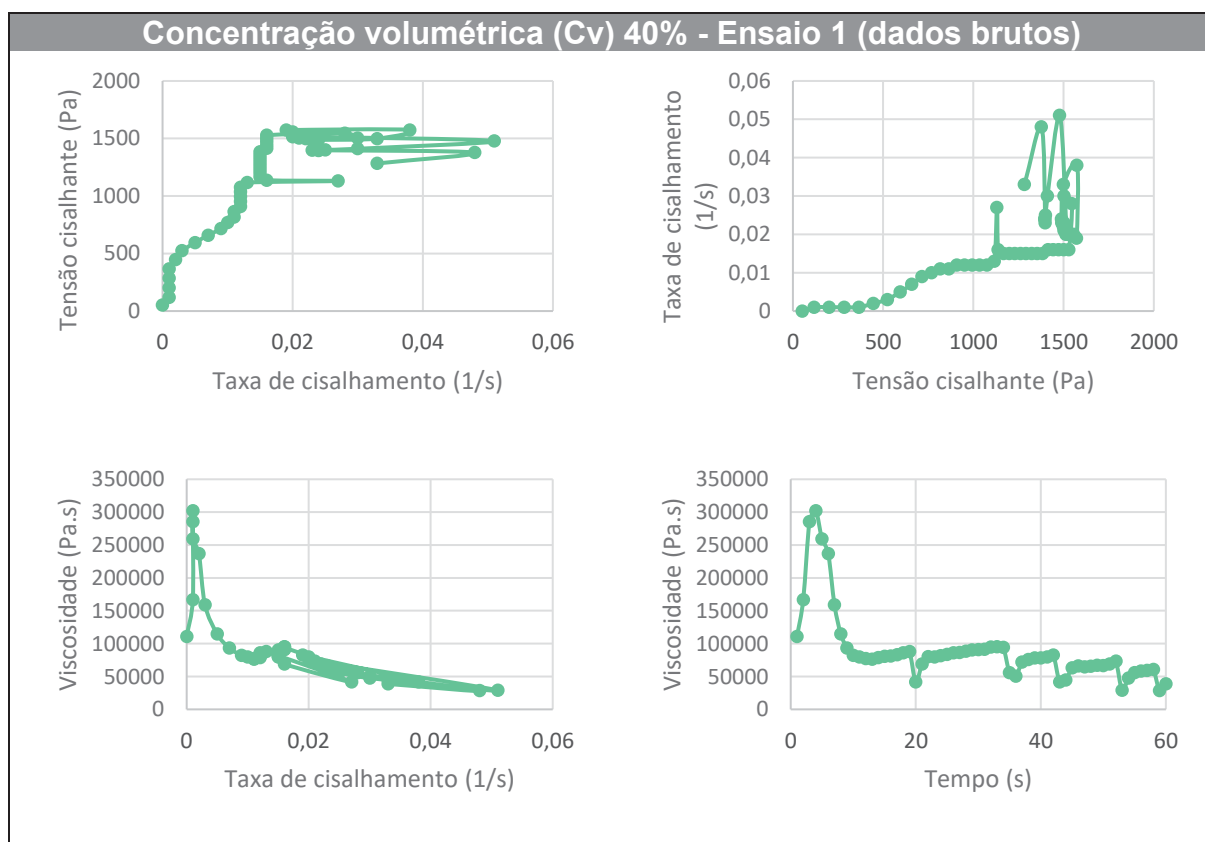
FONTE: O autor (2019)

Pelos dados apresentados, os valores do primeiro ensaio não se mostram adequados por conta dos picos gerados na viscosidade durante o tempo do ensaio. Esses picos são causados pelo fato do *spindle* não conseguir rotacionar de maneira correta, conforme citado anteriormente. Portanto, esse resultado falho foi descartado das análises posteriores, ou seja, somente o ensaio 2 foi considerado.

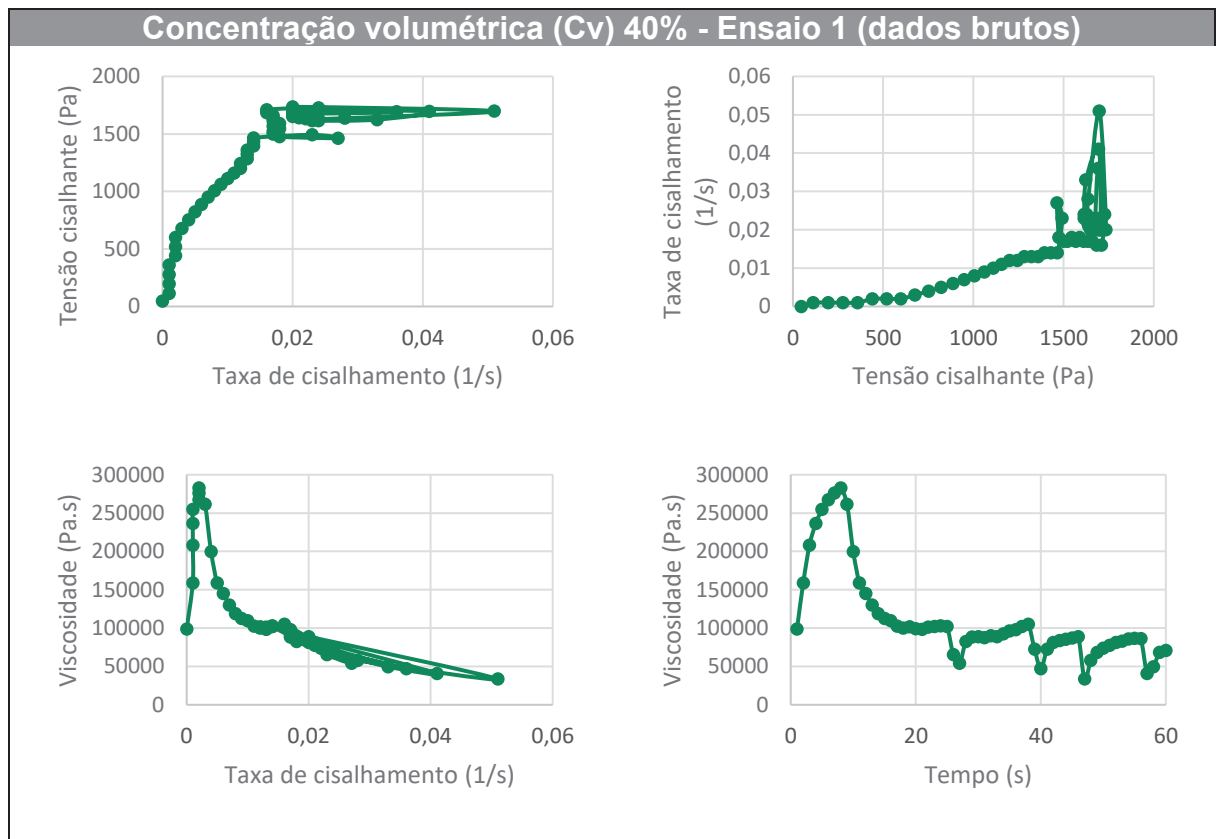
Por último, foram verificados os resultados para o ensaio 3, com concentração volumétrica de 40%. Foram realizados 3 ensaios, entretanto, erros ocorreram e apenas dois resultados puderam ser aproveitados. Estes estão apresentados no QUADRO 14 (ensaio 1) e QUADRO 15 (ensaio 2).

Nota-se que, comparando os ensaios, os valores parecem similares, apesar de ter alguns picos para baixo na viscosidade. No GRÁFICO 2 as curvas de viscosidade para os ensaios válidos são mostradas, onde foi possível considerar os dois ensaios válidos.

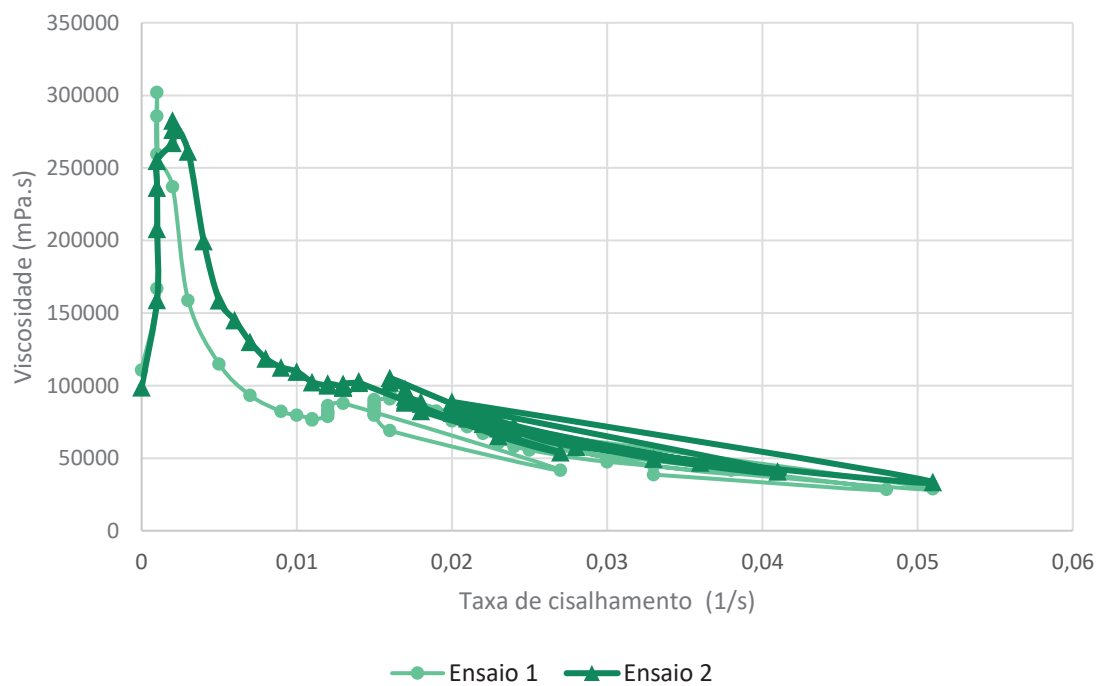
QUADRO 14 – RESULTADOS REOMÉTRICOS OBTIDOS PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 40%



FONTE: O autor (2019)

QUADRO 15 – RESULTADOS REOMÉTRICOS OBTIDOS PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 40%

FONTE: O autor (2019)

GRÁFICO 2 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA ENSAIO COM C_v DE 40%

FONTE: O autor (2019)

Apesar dos problemas apresentados, em todos os quadros é possível notar que o comportamento se assemelha ao proposto por Herschel-Bukley

FIGURA 28), um fluido Bingham completo, ou seja, semelhantes aos resultados de bibliografia. Para melhor interpretação e similaridade com bibliografia, os valores foram tratados.

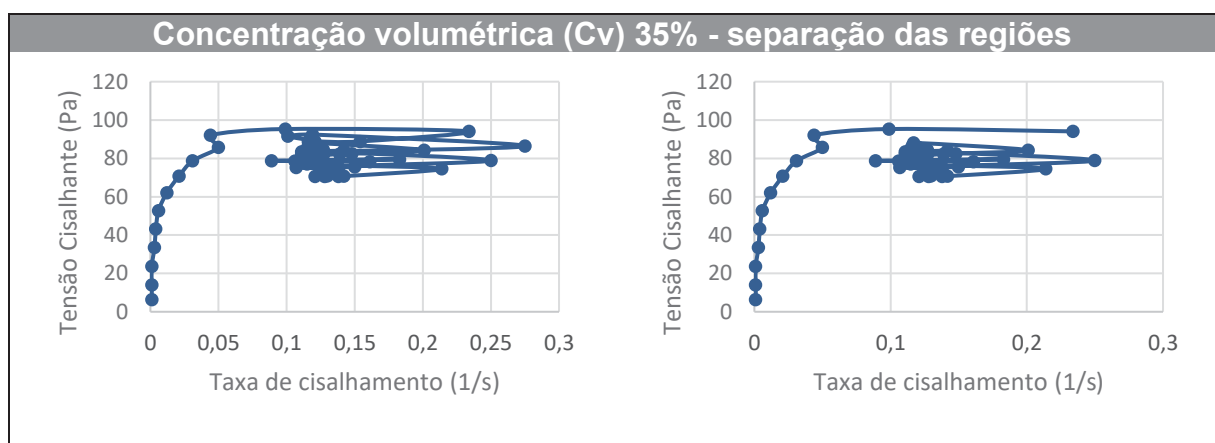
Nas amostras coletadas em Brumadinho/MG, os ensaios mostraram valores dispares e não coerentes a partir de 10 segundos, portanto somente os dados até esse instante de tempo foram empregues para as simulações.

3.2.1.1 Dados tratados

A partir dos valores brutos, foi necessário tratar os dados em virtude de alguns dados caírem em oscilações do equipamento ou mesmo no problema da amostra iniciar sua sedimentação.

Quando iniciada a adequação desses valores, notou-se que, nos gráficos de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento, em muitas situações existiam duas regiões, uma primeira no qual o ensaio se comporta de maneira coerente e outra onde as medidas não são coerentes. Esse fato pode ser ilustrado, como exemplo, pelo QUADRO 16 que é relacionado ao ensaio 3 da amostra com 35%:

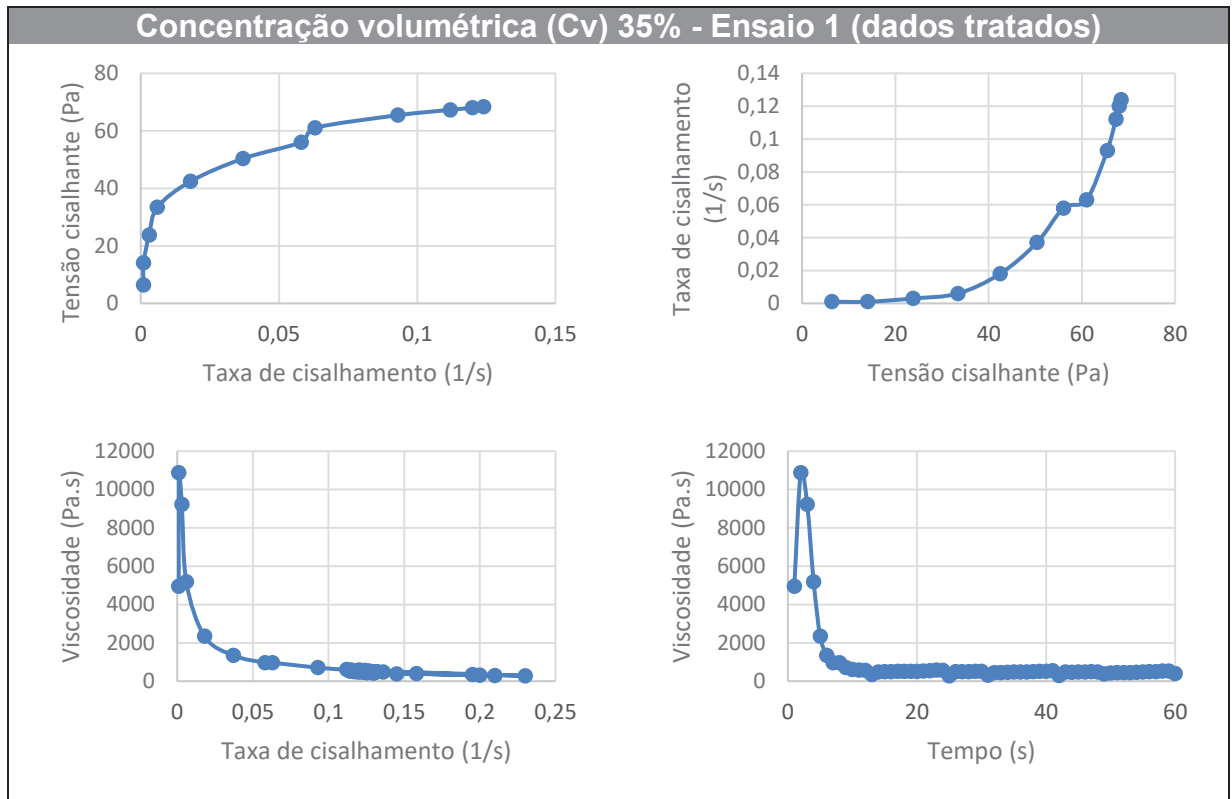
QUADRO 16 – EXEMPLO PARA DIVISÃO DOS DADOS EM REGIÕES



FONTE: O autor (2019)

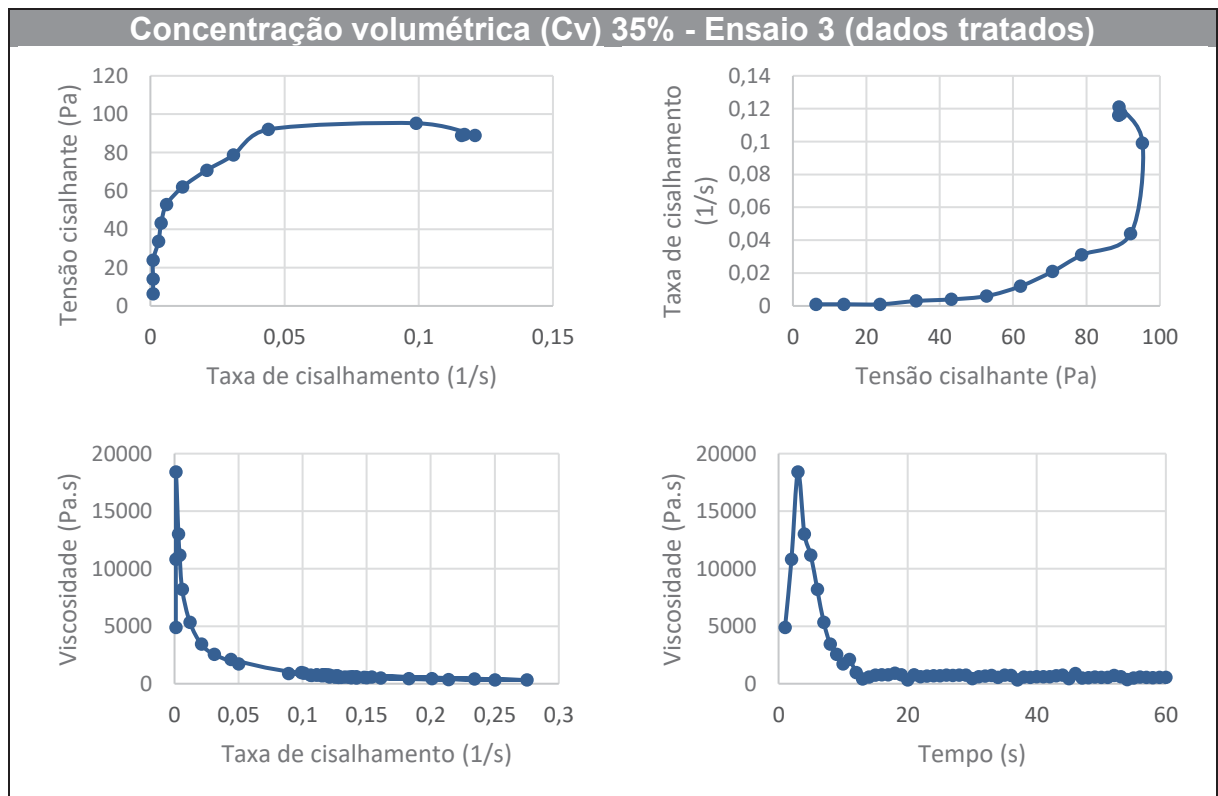
Portanto, analisando os resultados obtidos, têm-se os seguintes valores para cada ensaio verificado (QUADRO 17 ao QUADRO 23):

QUADRO 17 – DADOS TRATADOS PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 35%

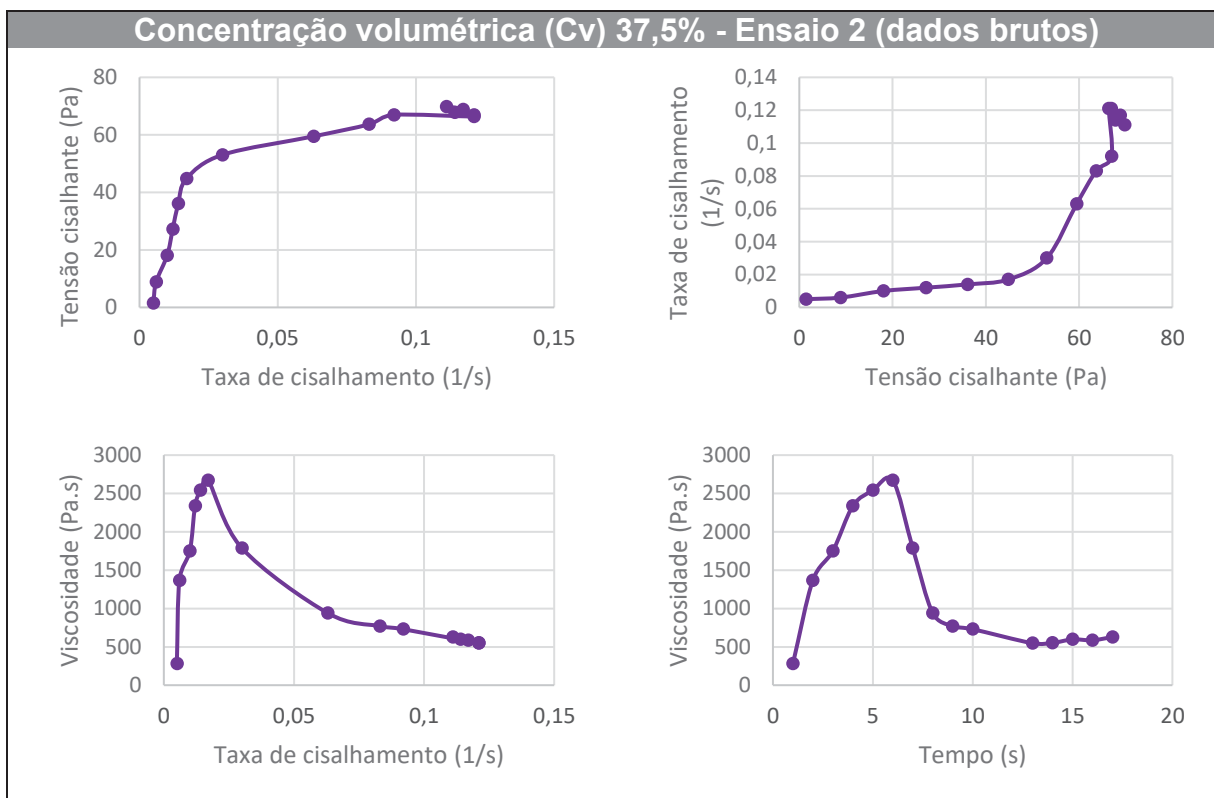


FONTE: O autor (2019)

QUADRO 18 – DADOS TRATADOS PARA O ENSAIO 3 COM C_v DE 35%



FONTE: O autor (2019)

QUADRO 19 – DADOS TRATADOS PARA O ENSAIO 2 COM C_v DE 37,5%

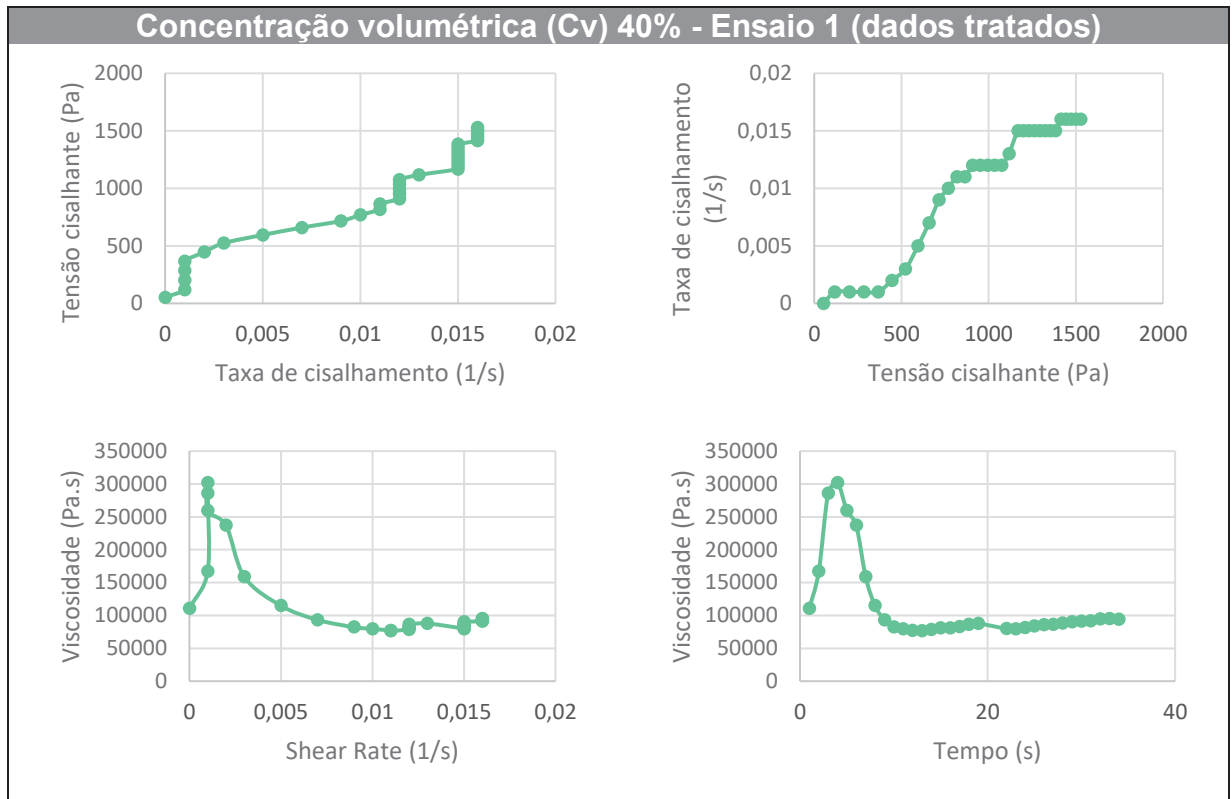
FONTE: O autor (2019)

Analisando os resultados para concentração volumétrica de 37,5% nota-se que a viscosidade está com valores muito inferiores ao de 35%, o que não deveria ocorrer, por conta da quantidade de água. Com mais água, o material deve apresentar uma menor viscosidade, ou seja, deve escoar mais facilmente.

Portanto, isso indica que ocorreu algum erro na realização do ensaio na amostra. Alguns dos possíveis motivos já foram elencados anteriormente, entretanto como os valores não são adequados, essa amostra também foi descartada para as futuras análises.

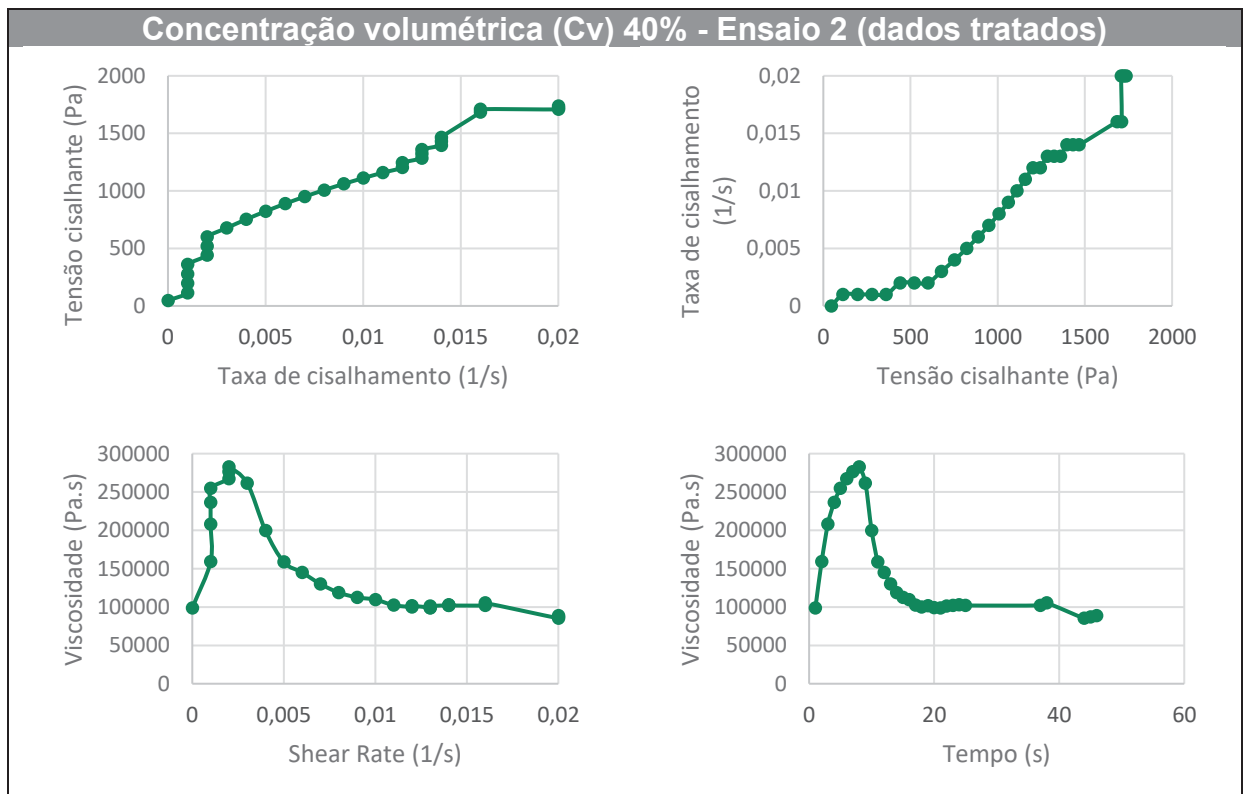
A próxima concentração (40%) apresentou os seguintes dados tratados, descrito no QUADRO 20.

QUADRO 20 – DADOS TRATADOS PARA O ENSAIO 1 COM C_v DE 40%



FONTE: O autor (2019)

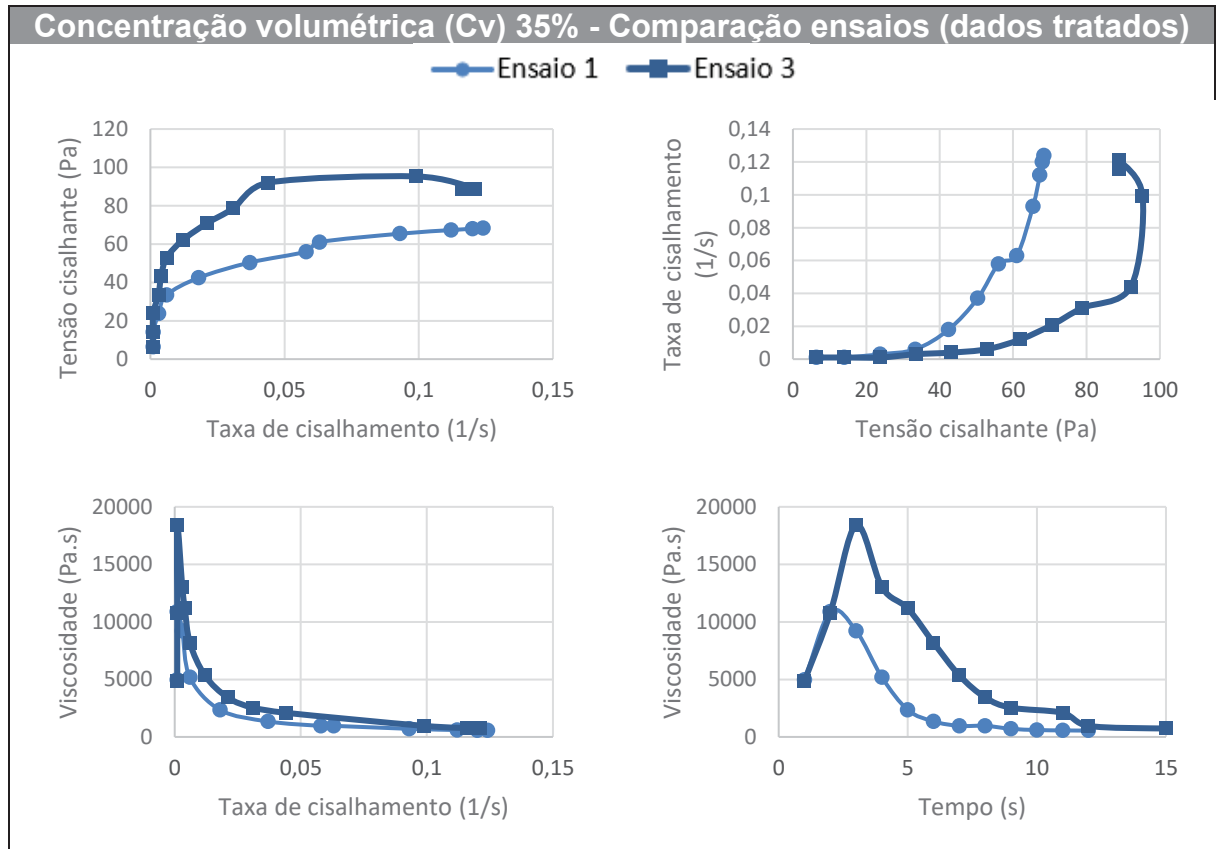
QUADRO 21 – DADOS TRATADOS PARA O ENSAIO 2 COM C_v DE 40%



FONTE: O autor (2019)

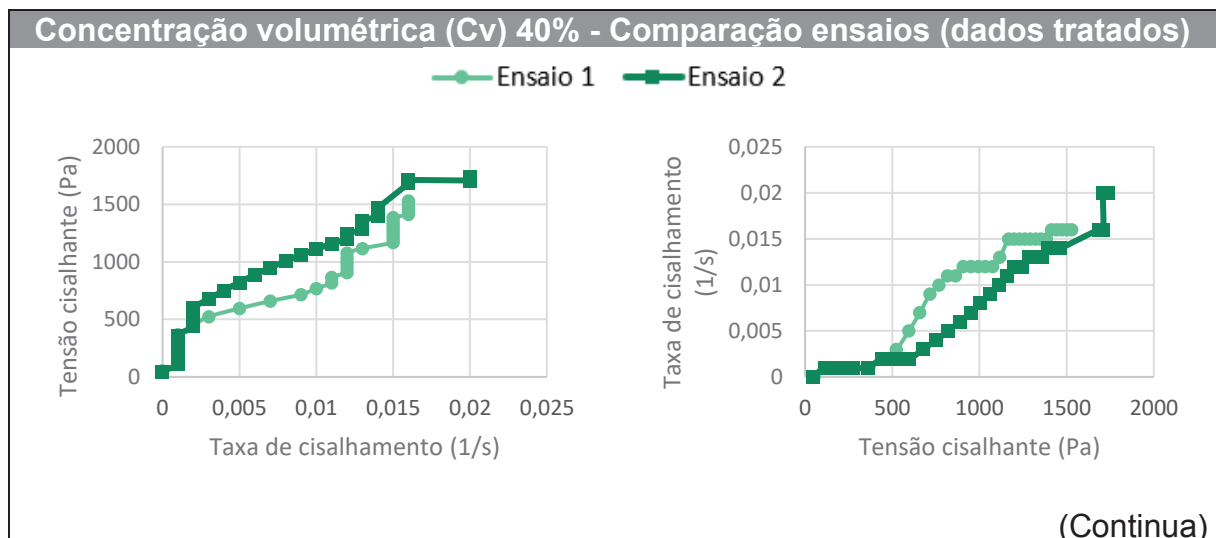
Os resultados entre os ensaios foram comparados para ver se existia alguma discrepância ou valores que se apresentavam fora do comportamento esperado. Essa comparação é ilustrada no QUADRO 22 e QUADRO 23.

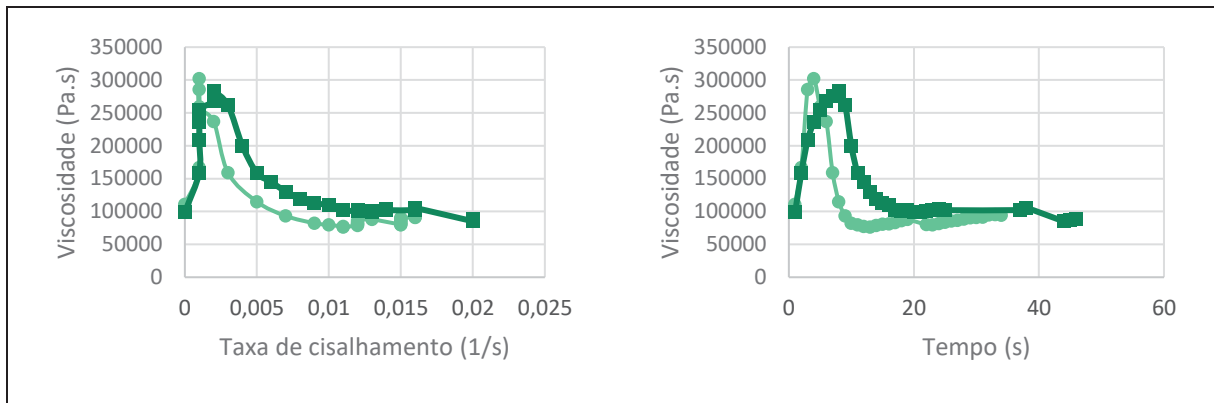
QUADRO 22 – COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS NA AMOSTRA COM C_v DE 35%



FONTE: O autor (2019)

QUADRO 23 – COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS NA AMOSTRA COM C_v DE 40%

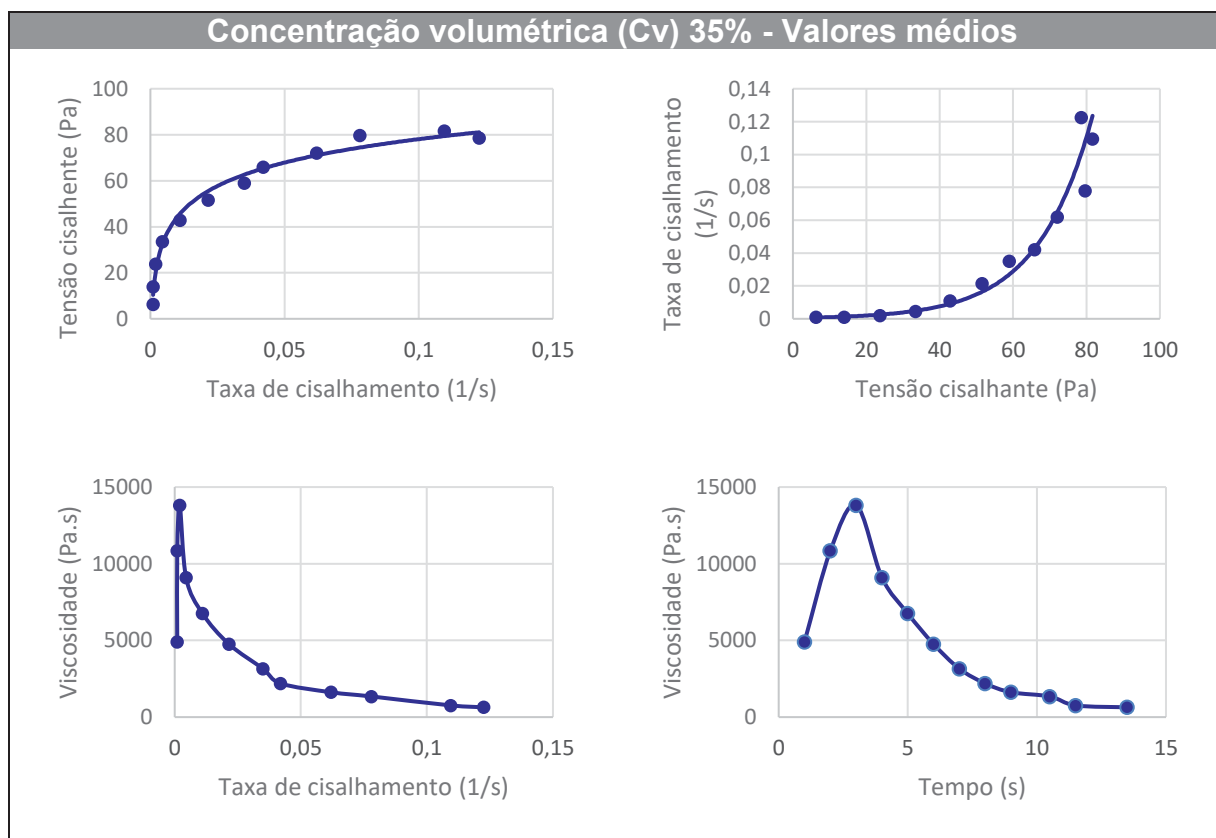




FONTE: O autor (2019)

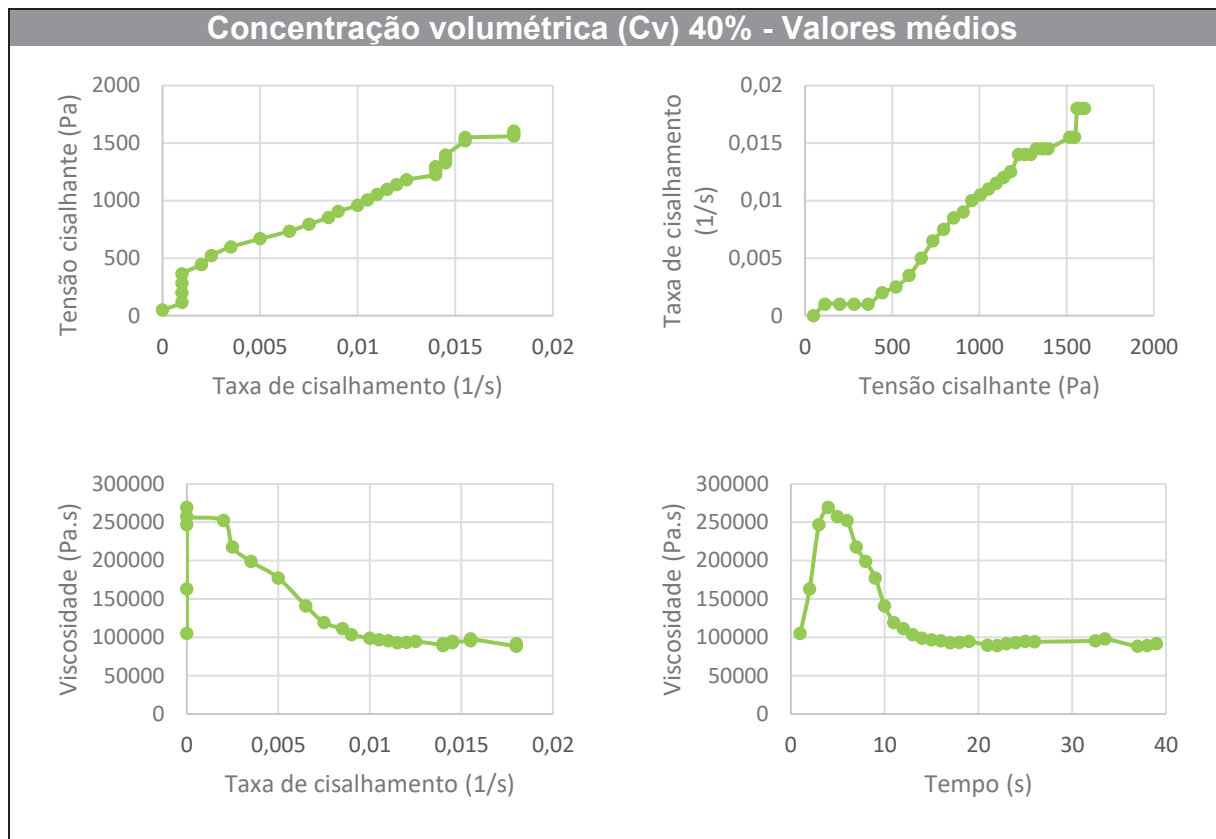
Nota-se que os valores gerados são coerentes, apesar das amostras com C_v 35% possuírem maior diferença entre si comparado a 40%. Considerou-se satisfatórias, em virtude da escala de tensões de cisalhamento (100 Pa para 35% e 1700 Pa para 40%), ou seja, o material mais seco é muito mais difícil de escoar. Disso foram adotados parâmetros médios que resultam no QUADRO 24 e QUADRO 25:

QUADRO 24 – VALORES MÉDIOS PARA A CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE 35%



FONTE: O autor (2019)

QUADRO 25 – VALORES MÉDIOS PARA A CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE 40%



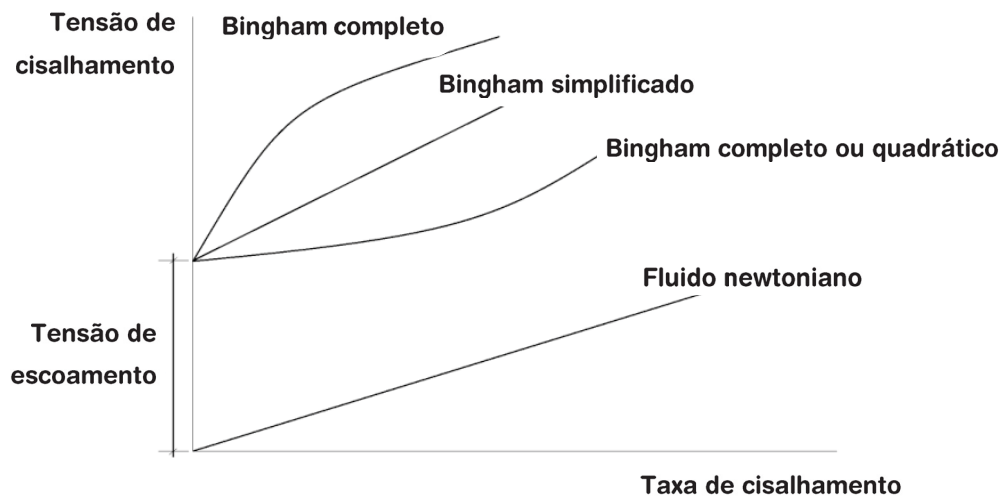
FONTE: O autor (2019)

Dos quadros descritos é interessante perceber que para a situação estudada, o cenário com C_v 40% não é melhor representado por fluido de Bingham completo e sim por um Bingham simplificado, no qual a taxa de cisalhamento é elevada ao expoente igual à 1, portanto, uma reta.

Entretanto, ainda é necessário avaliar como essas informações são inseridas no software RiverFlow2D, visto que este só permite para o comportamento do fluido, as informações de viscosidade e tensão de início de escoamento, ambos constantes. Como a viscosidade deve ser a mesma durante toda a análise, os valores de ascensão e descenso nos gráficos foram ignorados, sendo utilizado a viscosidade residual. Já a tensão para o início do escoamento é apresentada pelos gráficos dos quadros anteriores, ela é o valor no trecho onde não há deslocamento da amostra. É importante destacar que o comportamento escolhido para o fluido adiciona equacionamentos diferentes para o termo de resistência (QUADRO 5), sendo que o software não permite alterar durante a análise. O comportamento do fluido pode ser explicado pela figura presente no próprio manual do software, ilustrada a seguir (FIGURA 43).

Pela FIGURA 43, nota-se que o comportamento para C_v 35% é o Bingham Completo, se analisado a viscosidade residual para este caso essa fica em 700 Pa.s e a tensão de escoamento é de 6,35 Pa. Para o caso com C_v 40%, o comportamento é o Bingham simplificado, a viscosidade residual é 92200 Pa.s e a tensão crítica é 49,35 Pa. Dessa forma é possível atribuir as propriedades do material e analisar a mancha de inundação para essas situações.

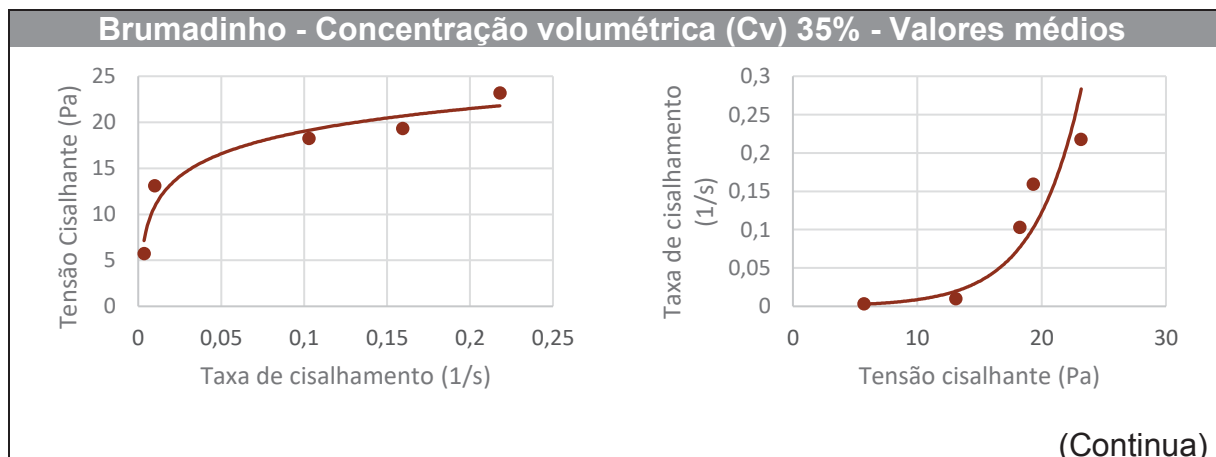
FIGURA 43 – COMPORAMENTOS PARA FLUIDO NO SOFTWARE RIVERFLOW 2D

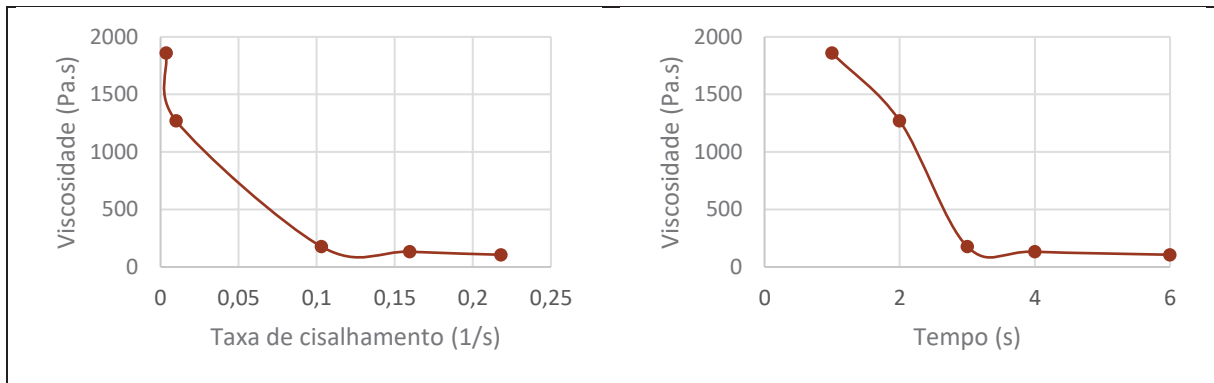


FONTE: Hydronia LLC (2018)

O mesmo processo pode ser realizado para as amostradas de Brumadinho/MG, entretanto o intervalo no qual os valores permaneceram coerentes não passou dos 10 segundos. Dessa forma, obteve-se os resultados dos QUADRO 26 e QUADRO 27.

QUADRO 26 – VALORES MÉDIOS PARA A CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE 35%

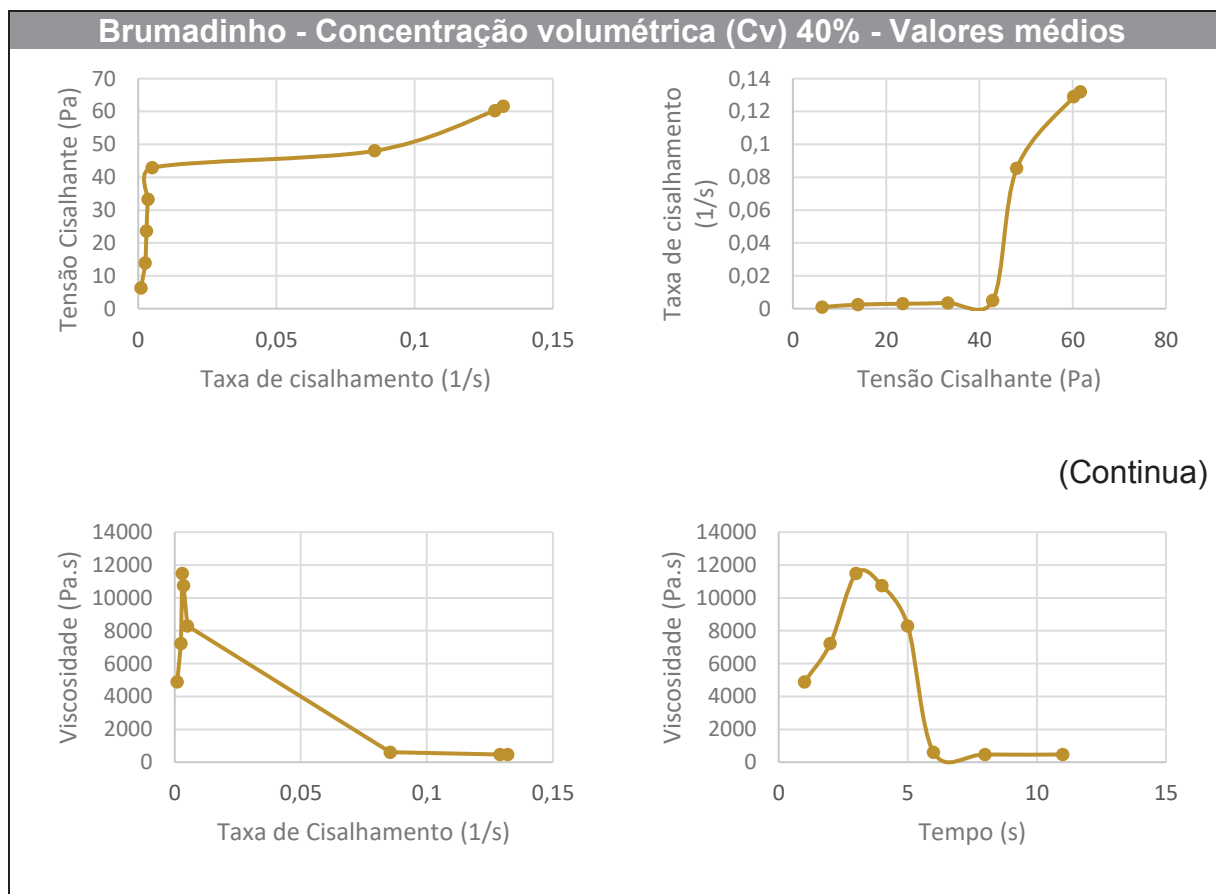




FONTE: O autor (2020)

Utilizando a linha de tendência do material cruzando com o eixo vertical, notou-se que o material possui um comportamento Bingham completo, cuja viscosidade residual é de 119,37 Pa.s e tensão inicial de escoamento de 5,73 Pa. Os resultados para C_v de 40% são ilustrados no QUADRO 27.

QUADRO 27 – VALORES MÉDIOS PARA A CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE 40%



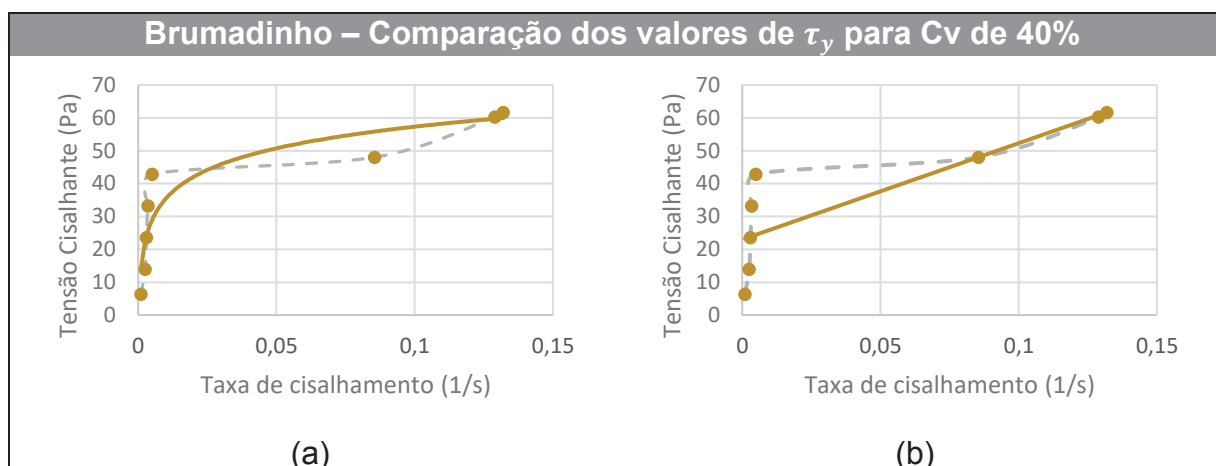
(Continua)

FONTE: O autor (2020)

Pelos gráficos é possível notar que as tensões cisalhantes desenvolvidas são menores assim como as taxas de cisalhamento possuem valores maiores quando comparado com o material argiloso. Portanto, o material coletado é mais fluido.

Entretanto, para a situação de C_v 40%, o gráfico de tensão cisalhante x taxa de cisalhamento pode gerar duas interpretações, uma indicando que o fluido é Bingham completo com tensão inicial de escoamento de 6,31 Pa e outra no qual o comportamento é Bingham simplificado com tensão de escoamento 22,99 Pa, conforme ilustra o QUADRO 28. Para verificar as diferenças nos modelos, para essa situação foram utilizados os dois valores possíveis. A viscosidade é a mesma para ambos, no caso, igual a 467,40 Pa.s, obtido do gráficos do QUADRO 27.

QUADRO 28 – COMPARAÇÃO DAS TENSÕES INICIAIS E MODELOS DE ESCOAMENTO PARA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE 40% NA AMOSTRA DE BRUMADINHO



FONTE: O autor (2020)

LEGENDA: (a) modelo reológico Full Bingham, (b) modelo reológico Bingham Simplificado

Vale ressaltar que apesar das amostras serem de Brumadinho, as concentrações volumétricas ensaiadas neste trabalho não representam necessárias as da tragédia que ocorreu. As concentrações adotadas para este trabalho foram as mesmas que as utilizadas nas amostras com solo argiloso.

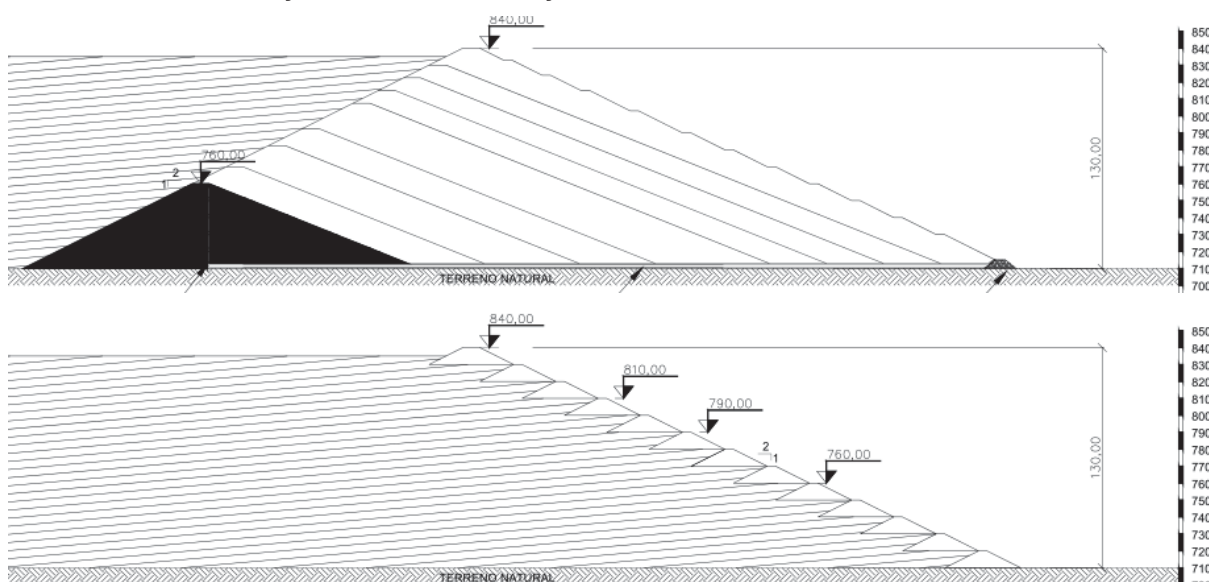
3.3 DESCRIÇÃO DA BARRAGEM ANALISADA

O estudo de caso analisado foi uma adaptação de um projeto, não executado, no qual a premissa original era o alteamento para jusante do barramento. No entanto, para tentar reproduzir uma situação semelhante aos desastres recentes que

aconteceram com barragens de rejeito, o esquema do projeto foi alterado para montante. Ressalta-se novamente que essa situação é hipotética, não sendo o projeto idealizado e sim uma adaptação para imitar o cenário como os dos rompimentos que ocorreram.

Para tentar não mudar demais a morfologia da barragem, foi utilizada a crista do último alteamento como a partida dessa seção hipotética. Sendo assim, o alteamento final ficaria no mesmo eixo da original e com a mesma elevação (840m). A FIGURA 44 ilustra essa diferença.

FIGURA 44 – SEÇÃO ORIGINAL E SEÇÃO UTILIZADA DO BARRAMENTO NO ESTUDO



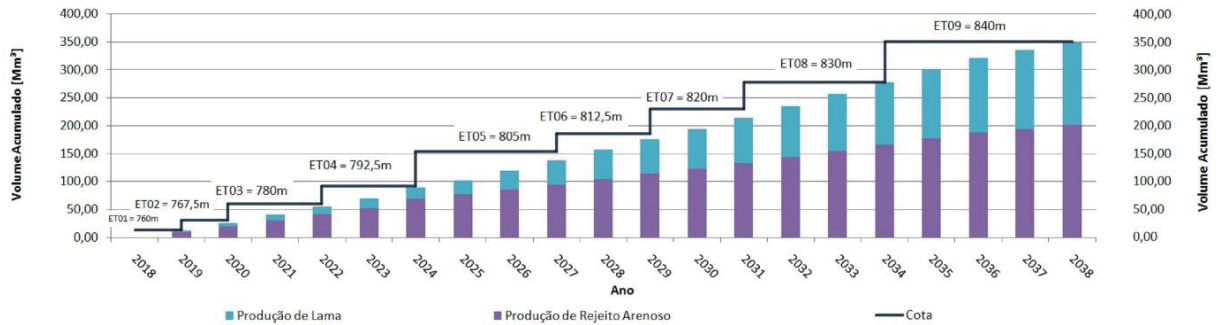
FONTE: O autor (2019)

Partindo dessa situação hipotética, foram analisados os alteamentos do projeto original, descritos na FIGURA 45. Dessa forma foi possível escolher algumas situações para serem reproduzidas. Como a seção foi alterada, os volumes expressos também são diferentes dos da condição proposta, porém a figura é um balizador para a escolha das análises.

Usualmente o rompimento desse tipo de estrutura ocorre no enchimento do reservatório, nos primeiros 5 anos ou quando a estrutura tem mais de 50 anos, segundo Serafim (1981). Por essa razão, escolheu-se reproduzir a condição inicial (EL. 760 metros), com até 5 anos (EL. 792,5 metros), uma intermediária (EL. 812,5 metros) e final (EL. 840 metros). Como a barragem alteada para montante não possui as mesmas cotas comparada à alteada para jusante, as elevações ficaram em 760

metros para a inicial, 790 metros para até 5 anos de operação, 810 metros para situação intermediária e 840 para a situação final.

FIGURA 45 – ALTEAMENTOS DA BARRAGEM ORIGINAL E VOLUMES ACUMULADOS



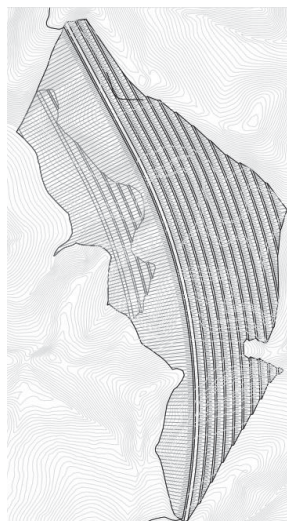
FONTE: *****-***-CON-012

Dessa forma, os formatos das condições propostas são ilustrados na FIGURA 46. Para todas as condições, o reservatório está 5 metros abaixo da crista (5 metros de borda livre).

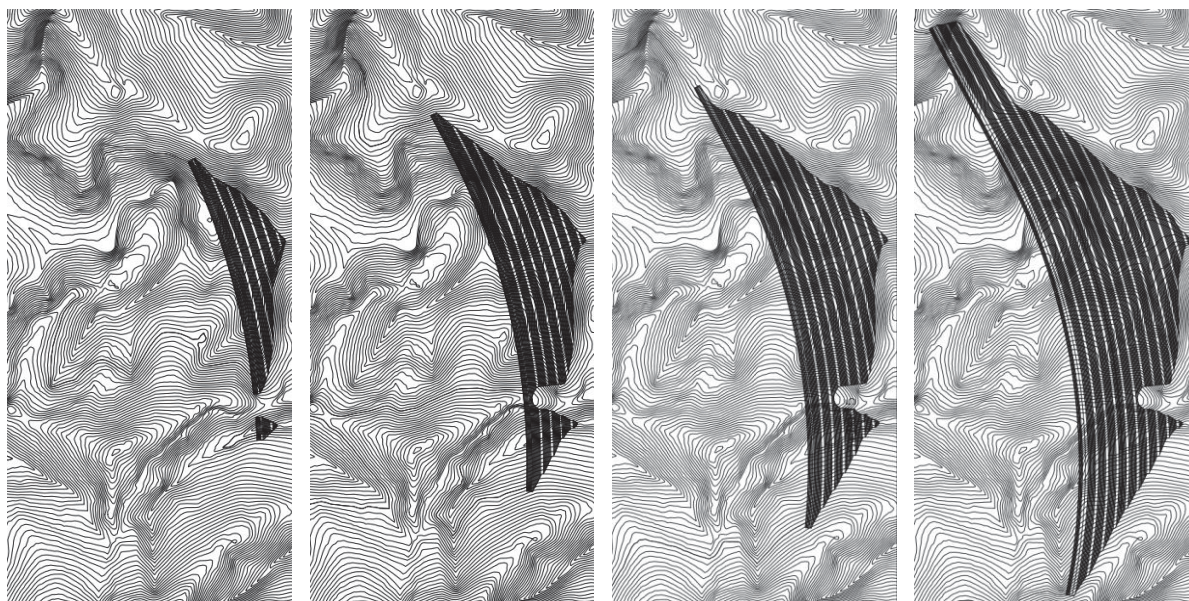
Com esses dados é possível gerar os resultados das simulações numéricas e assim comparar os mapas de inundação e suas diferenças. Para as simulações geotécnicas, como usualmente o valor para rejeitos é de 16 kN/m^3 e o peso específico da água $9,81 \text{ kN/m}^3$ (aproximadamente 10 kN/m^3), o valor para o peso específico submerso no modelo numérico foi de 6 kN/m^3 .

FIGURA 46 – PLANTA COM BARRAGEM PARA JUSANTE E ALTEAÇÃO COM BARRAGEM PARA MONTANTE

(a) Alteamento para jusante (projeto original)



(b) Alçamento para montante (alteração para o desenvolvimento do estudo)



FONTE: (a) *****-CON-012 (b) O autor (2019)

3.4 FERRAMENTA COMPUTACIONAL UTILIZADA

Para o desenvolvimento do modelo numérico foi utilizado o *software* RiverFlow2D, cujo fornecedor é a Hydronia LLC. Este *software* é capaz de simular tanta parte hidráulica quanto a hidrológica, combinadas ou não, através de um modelo de escoamento em duas dimensões (2D). A versão utilizada a 2018, sendo que foi lançado uma versão subsequente em 2020. Além disso, a versão empregue é a RiverFlow 2D QGis, no qual os módulos do RiverFlow são habilitados através da plataforma gráfica do *software* QGis. Para as simulações do escoamento não newtoniano é preciso ter o módulo *Mud and Debris Model Flow*, com este é possível habilitar as propriedades de tensão de escoamento e viscosidade.

Após estabelecer esses parâmetros por meio de ensaios em laboratório, foram simuladas as situações dos rompimentos. As simulações foram feitas com uma malha triangular de 30 metros, condição de contorno de jusante a 50 km do barramento e condição de jusante o reservatório inteiro da barragem (FIGURA 47). Os termos de resistência foram o coeficiente de Manning para a situação com água, no caso de $0,035 \text{ m}^{-1/3}.\text{s}$. Para a situação com fluido não newtoniano, foram os parâmetros obtidos nos ensaios aplicados nas formulações de Bingham Completo e Bingham Simplificado.

FIGURA 47 – MALHA UTILIZADA NAS SIMULAÇÃO E RESPECTIVO DETALHE



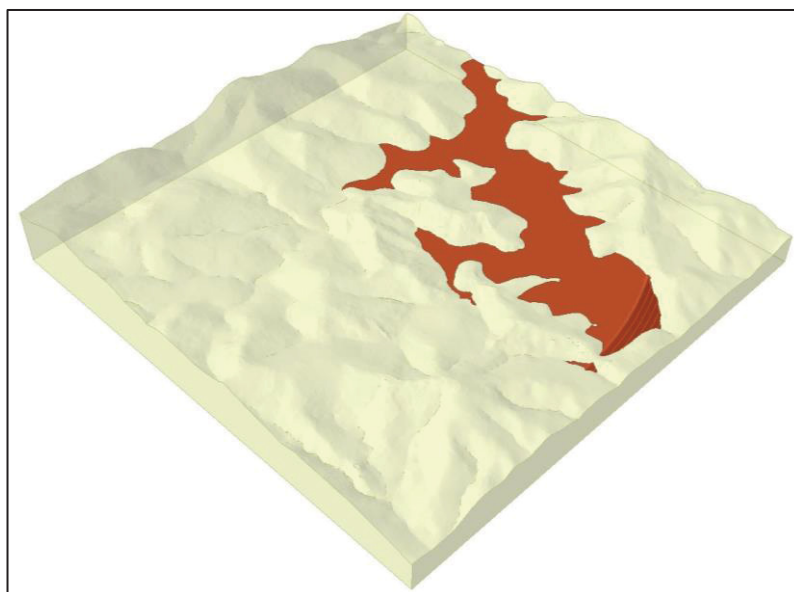
FONTE: O autor (2020)

No software é possível tanto rodar a simular por CPU (*Central Processing Unit*) quanto GPU (*Graphics Processing Unit*). Nas desenvolvidas neste trabalho, optou-se pela GPU em virtude da máquina disponível. Esta é um computador com um processador i9-7920 que possui 12 núcleo e 24 processadores lógicos. Além disso, a máquina possuía uma memória física (RAM) instalada de 64 GB e placa gráfica NVIDIA GeForce RTX 2080. Este workstation é responsabilidade do Escritório Modelo de Engenharia Civil (EMEA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e foi disponibilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para gerar os resultados relacionados com a ruptura por liquefação foram utilizados os modelos digitais desenvolvidos apresentados na FIGURA 48, FIGURA 49, FIGURA 50 e FIGURA 51, cada uma representando uma elevação do reservatório.

FIGURA 48 – MODELO 3D BARRAGEM (EL.760m) E RESERVATÓRIO (EL.755m)



FONTE: O autor (2019)

FIGURA 49 – MODELO 3D BARRAGEM (EL.790m) E RESERVATÓRIO (EL.785m)



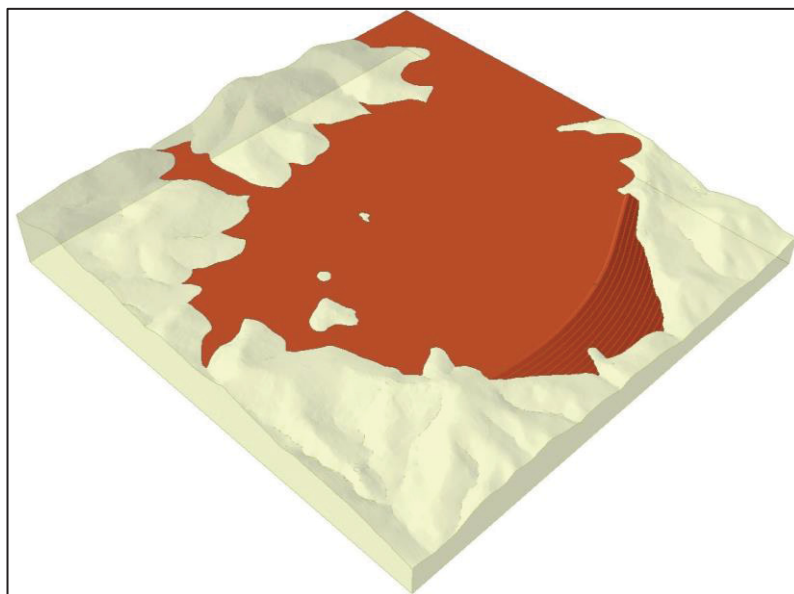
FONTE: O autor (2019)

FIGURA 50 – MODELO 3D BARRAGEM (EL.810m) E RESERVATÓRIO (EL.805m)



FONTE: O autor (2019)

FIGURA 51 – MODELO 3D BARRAGEM (EL.840m) E RESERVATÓRIO (EL.835m)



FONTE: O autor (2019)

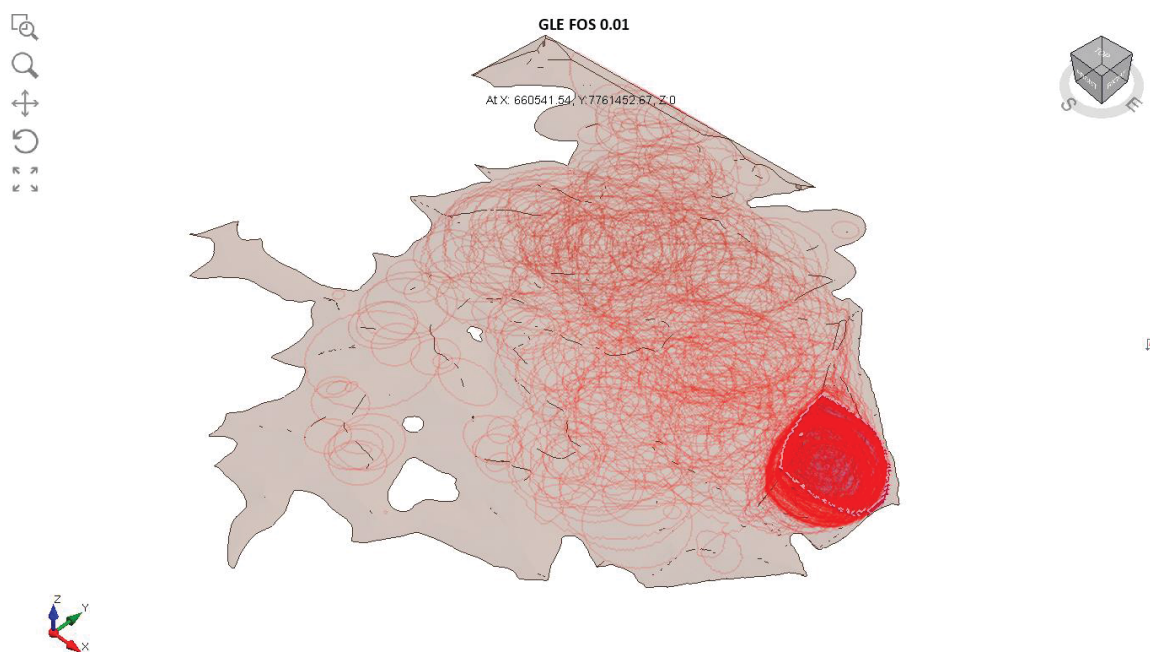
Esses modelos digitais utilizam a topografia da implantação da barragem, que está de metro em metro. Foi gerado uma superfície para o terreno natural e para o reservatório e barragem utilizando o AutoCAD Civil 3D. O próprio *software* da RocScience, o Slide 3, importa essas superfícies. A diferença entre as superfícies

pode ser notada pela variação na coloração dos materiais nas figuras dos modelos digitais a seguir.

O primeiro modelo a ser desenvolvido foi com a EL. 840 m, entretanto ao se iniciar as simulações, os resultados não foram os esperados. Pela ideia original, espera-se que a cunha de ruptura do barramento fosse englobar grande parte do material presente no reservatório. Esse conceito era pretendido principalmente em virtude das imagens obtidas depois da falha da barragem B-I em Brumadinho/MG. Como nesse acidente grande parte do material foi liberado esperava-se o mesmo no modelo numérico, entretanto, a simulação realizada para a EL. 840m gerou os seguinte resultados (FIGURA 52 e FIGURA 53). Existem outros tipos de falhas que liberam rejeito, neste trabalho, a tentativa era recriar algo similar a Brumadinho, porém cabe ressaltar que este não é o único, existem outros modos elencados no item 2.7.

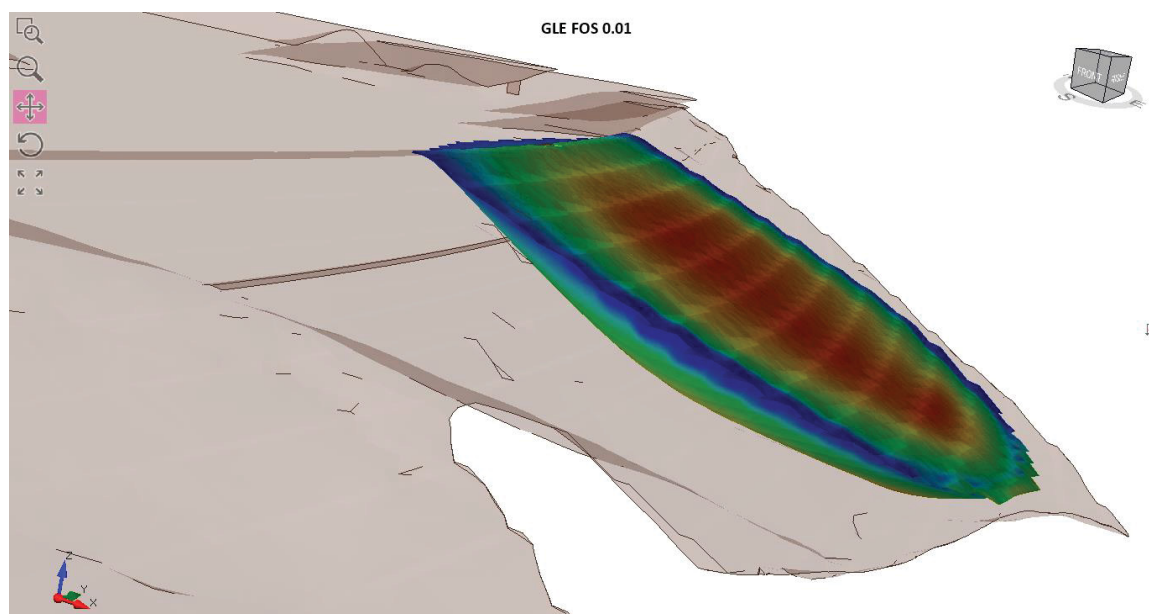
Na FIGURA 52 nota-se que existe várias cunhas de ruptura na região (círculos vermelhos), portanto, todas com fator de segurança (FS) menores do que 1. A região destacada na figura é onde ocorre a cunha com maior volume, que é reportada na FIGURA 53. Percebe-se nesta que a cunha apresenta uma ruptura rasa em relação ao reservatório inteiro.

FIGURA 52 – RUPTURAS GLOBAIS GERADAS PELO MODELO NUMÉRICO EL. 840m



FONTE: O autor (2019)

FIGURA 53 – RUPTURA DA CUNHA COM MAIOR VOLUME APRESENTADO

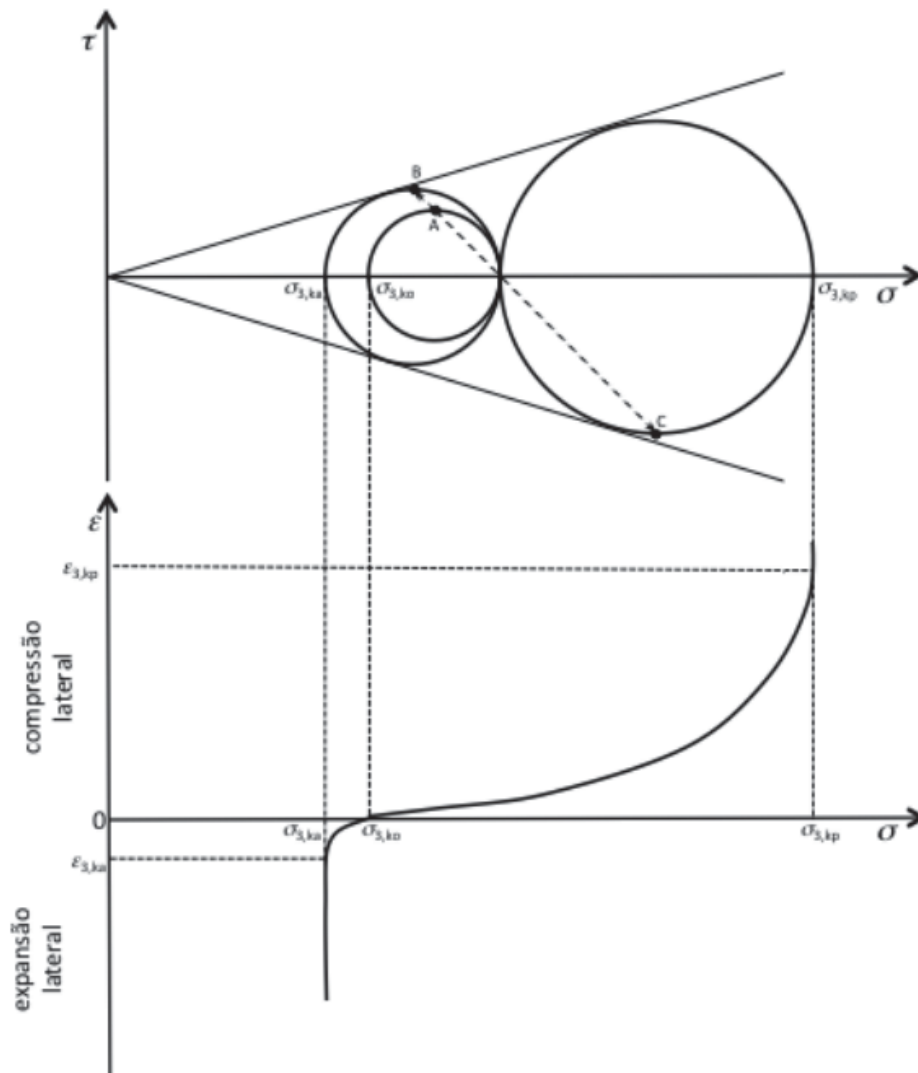


FONTE: O autor (2019)

Essa cunha de menores proporções não é capaz de representar o material que seria liberado em uma eventual ruptura do barramento. Isso poderia levar ao questionamento de que o modelo numérico não reproduz o evento real. Entretanto, tal arguição não pode ser considerada em virtude de o modelo conseguir reproduzir o que acontece na realidade, o problema é que ele não responde às etapas subsequentes à ruptura. Esse fato é explicado pela trajetória de tensões no círculo de Mohr. Esse conceito é aplicado quando um determinado material fica sobre aplicação de uma carga axial ou lateral e também na situação de desconfinamento lateral ou axial. A partir da FIGURA 54, esse conceito pode ser melhor compreendido, destacando a situação de compressão ou desconfinamento lateral.

Pela figura, observa-se que para situação de carregamento lateral (instalação de um tirante em contenção, por exemplo), o $\sigma_{3,kp}$ aumenta até o limite da ruptura, sendo que para isso vai existir uma grande deformação. O empuxo atuante nessa situação é o passivo, e usualmente é calculado pela teoria de Rankine ou de Coulomb. Essa situação não interessa no modelo desenvolvido, mas sim o outro cenário no qual o ponto A caminha até o ponto B, conforme ilustrado na FIGURA 54.

FIGURA 54 – TRAJETÓRIA DE TENSÕES PARA ESFORÇOS LATERAIS



FONTE: Dell'Avanzi (2016)

No desconfinamento lateral, o material presente no reservatório apresenta um alívio de tensões e conseqüentemente uma deformação. Essa diminuição da tensão σ_3 , cujo empuxo é ativo, gera um aumento nas diferenças das tensões σ_3 e σ_1 . Com isso o diâmetro do círculo de Mohr aumenta, levando a tocar a envoltória, e, portanto, à ruptura do material. No vídeo da barragem B-I, nota-se que existe uma ruptura inicial e depois “lamelas” de material do reservatório sendo liberado. Essas “lamelas” são ocasionadas pelo desconfinamento do material.

Esse cenário é descrito no relatório técnico da barragem B-I no córrego do Feijão em Brumadinho/MG. Robertson et al. (2019) relatam que

O material depositado na barragem mostrou uma súbita e significativa perda de resistência e rapidamente se tornou um líquido pesado que escoou a jusante em alta velocidade. Os vídeos mostram que a superfície de ruptura inicial foi relativamente rasa e foi seguida por uma série de deslizamentos rápidos e rasos com taludes íngremes que progrediram para trás até os rejeitos. (Robertson et al., 2019, p. i)

Essa situação de desconfinamento e ruptura sequenciais não é possível reproduzir no modelo numérico. Portanto, após detectado esse problema, decidiu-se atribuir a todo o material do barramento as propriedades viscosas e reológicas obtidas no ensaio. Essa situação seria a pior possível, na qual a barragem inteira se tornaria um fluido não newtoniano e escoaria para jusante.

Para área inundada a jusante, a superfície topográfica adotada é a disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por meio do projeto Topodata que é banco de dados geomorformétricos do Brasil, no qual é oferecido o Modelo Digital de Elevação (MDE) para todo o território nacional.

Entretanto, na hora de verificar a compatibilidade do barramento e suas elevações com o terreno disponível, existiu algumas incongruências. Essas diferenças são decorrentes da precisão do levantamento topográfico, onde a barragem possui um levantamento de 1 em 1 metro, enquanto o MDE apresenta levantamento de 30 em 30 metros, conforme ilustra a FIGURA 55.

FIGURA 55 – DIFERENÇA NOS DADOS TOPOGRÁFICOS DO TERRENO E BARRAGEM

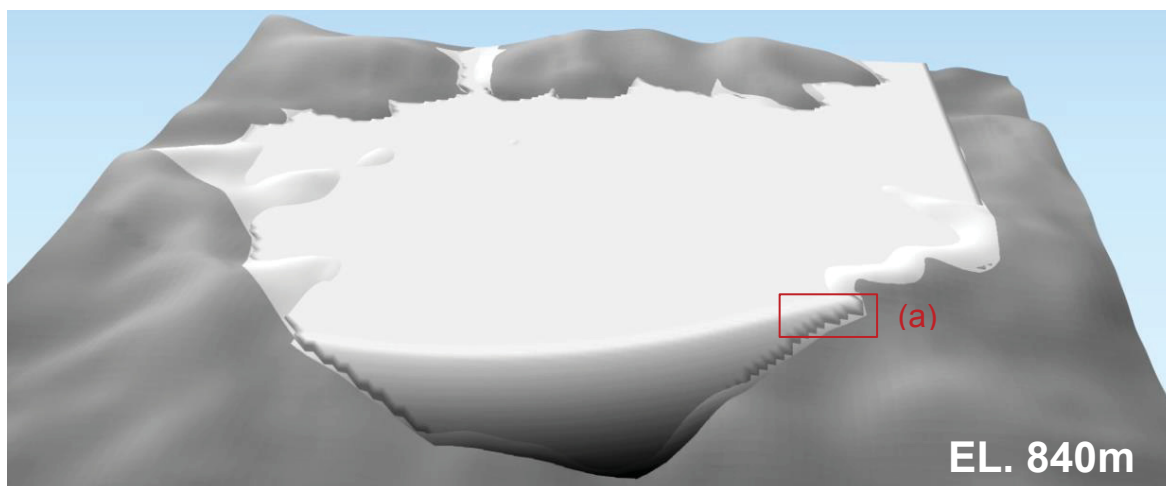


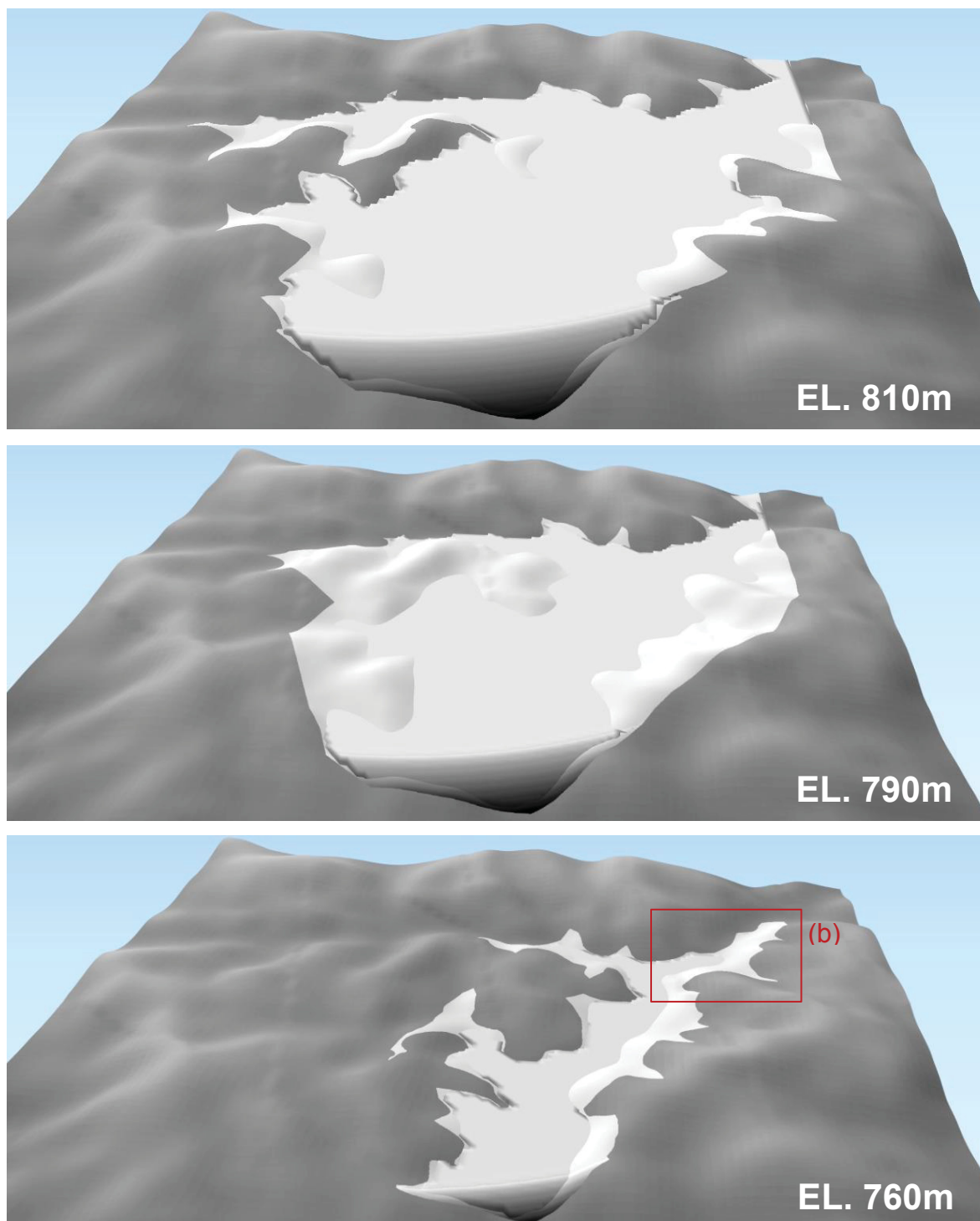


FONTE: O autor (2020)

Nota-se pelo detalhe assinalado a diferença entre a resolução de 1 metros para a de 30 metros, fazendo uma analogia com *pixels*, o arquivo do barramento possui um *pixel* muito menor que o topografia do terreno, assim, o encaixe da barragem não foi adequado, e esta acabou sendo alterada em função do *pixel* do terreno. Com isso, o volume do reservatório foi afetado, principalmente para as menores cotas. A FIGURA 56 indica essas alterações:

FIGURA 56 – ALTERAÇÕES GERADAS NA INTERAÇÃO BARRAGEM/TERRENO





FONTE: O autor (2020)

LEGENDA: (a) Detalhe no qual a topografia grossieira do terreno natural diminui a qualidade do trecho da barragem com, (b) detalhe para diminuição do volume do reservatório causado pela topografia mais grossieira do terreno natural.

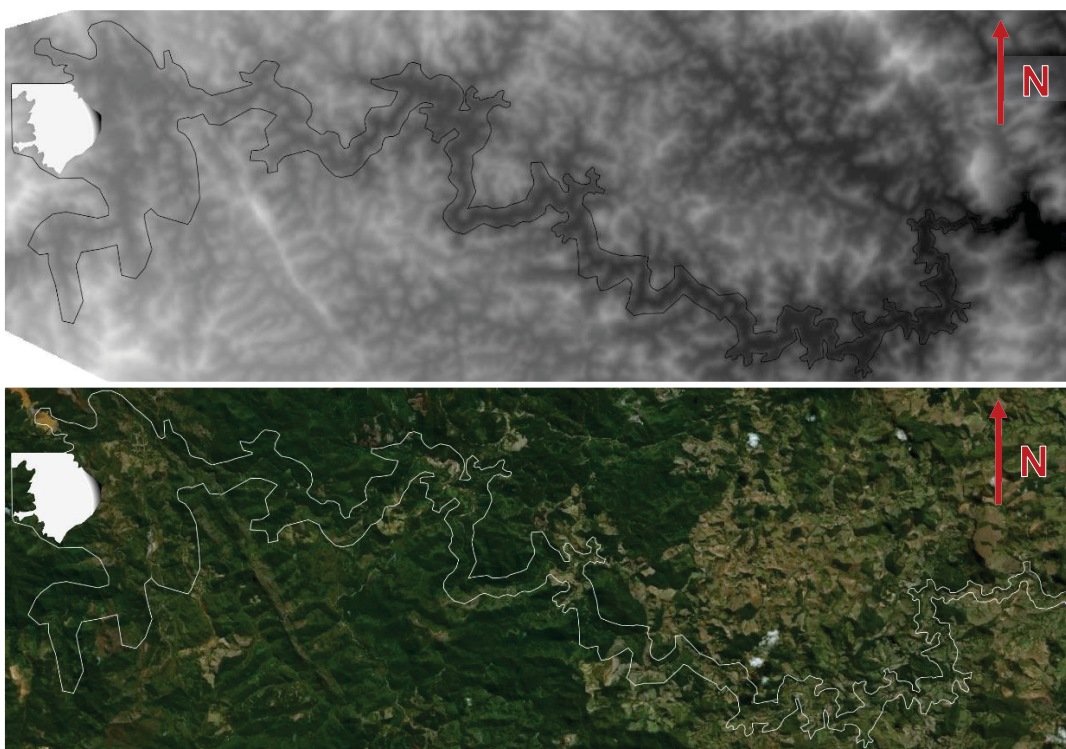
Pelo detalhe na EL. 840m é possível visualizar a resolução de 30 metros do terreno influenciar no talude da barragem. Essa situação também acontece nas outras elevações, porém em outros locais.

Outro detalhe a ser apresentado é o ilustrado na EL. 760m; existe uma espécie de mancha branca ao redor no reservatório da barragem. Essa mancha representa a área do reservatório com topografia com resolução de 1 metro, como o terreno para propagar possui 30 metros, alguns trechos são cortados ao juntar as duas superfícies (barramento e terreno). Esse fato também existe nas outras elevações, sendo mais acentuado na EL. 790 metros. Isso faz com que o volume armazenado no barramento seja menor, não representando sua totalidade, portanto, vai gerar uma mancha de inundação menor que a realidade. Isso evidencia um dos problemas de não ter uma topografia precisa.

Diversos autores tratam das variações da topografia do terreno nos resultados das simulações de propagação de onda. Porém, como nesse estudo não havia a possibilidade de realizar um levantamento topobatimétrico, o MDE do Topodata era a única opção disponível.

Com isso, foi utilizado 50 km de extensão do curso do rio, conforme ilustra a FIGURA 57, sendo que a condição de jusante a declividade média do canal, do pé da barragem até a seção destacada. Essa declividade foi de aproximadamente 0,0058 m/m.

FIGURA 57 – MDE DO TERRENO E IMAGEM DE SATÉLITE DA REGIÃO



FONTE: O autor (2020)

Com esses parâmetros estabelecidos, foram simuladas as 4 elevações com as 6 situações descritas, resumidas na TABELA 6:

TABELA 6 – RESUMO DOS VALORES UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Id.	Situação	Cv (%)	Tensão inicial de escoamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	Densidade (kg/m³)	Comportamento
Água	Água	-	0	$1,002 \cdot 10^{-3}$	1000	Newtoniano
CV35	Material Argiloso (Londrina/PR)	35	6,35	700	2970	Bingham completo
CV40	Material Argiloso (Londrina/PR)	40	49,35	92200	2970	Bingham simplificado
BR35	Material Siltoso (Brumadinho/MG)	35	5,73	119,37	3715	Bingham completo
BR40f	Material Siltoso (Brumadinho/MG)	40	6,31	467,40	3715	Bingham completo
BR40s	Material Siltoso (Brumadinho/MG)	40	22,99	467,40	3715	Bingham simplificado

FONTE: O autor (2020)

O modelo numérico permite a visualização de alguns resultados, para este estudo foram analisados a elevação máxima atingida pelo escoamento (nível máximo), o tempo até atingir esse nível máximo, o tempo para a chega da frente de onda, a profundidade do escoamento, a velocidade máxima e também o risco hidrodinâmico (propriedade obtida pela multiplicação da profundidade pela velocidade).

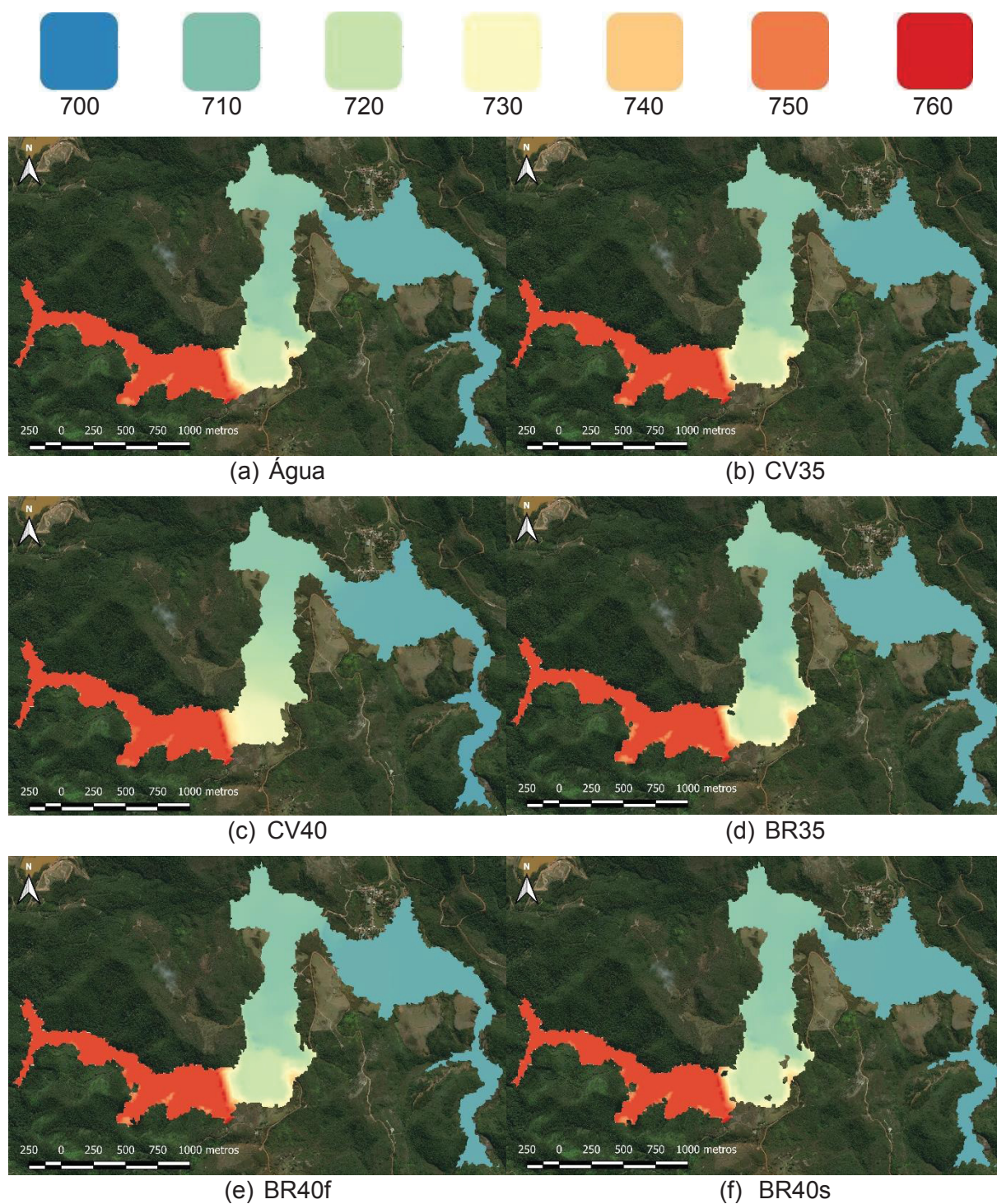
A seguir são apresentados os resultados para as 4 elevações propostas (EL. 840m, EL. 810m, EL. 790m, EL. 760m). Essas serão apresentadas conforme sua construção, portanto, da menor elevação para a maior.

4.1 BARRAMENTO COM EL. 760M

A situação inicial é com a EL. 760m. Já foi explanado sobre as limitações encontradas no modelo, porém essa situação foi a que apresentou menores diferenças em termos de propagação de material. Isso em virtude de o volume de

reservatório ser bem menor do que outras situações. Na FIGURA 58, a seguir, são mostradas as elevações cotas atingidas. Os cenários são identificados conforme a TABELA 6 (Água, CV35, CV40, BR35, BR40f, BR40s).

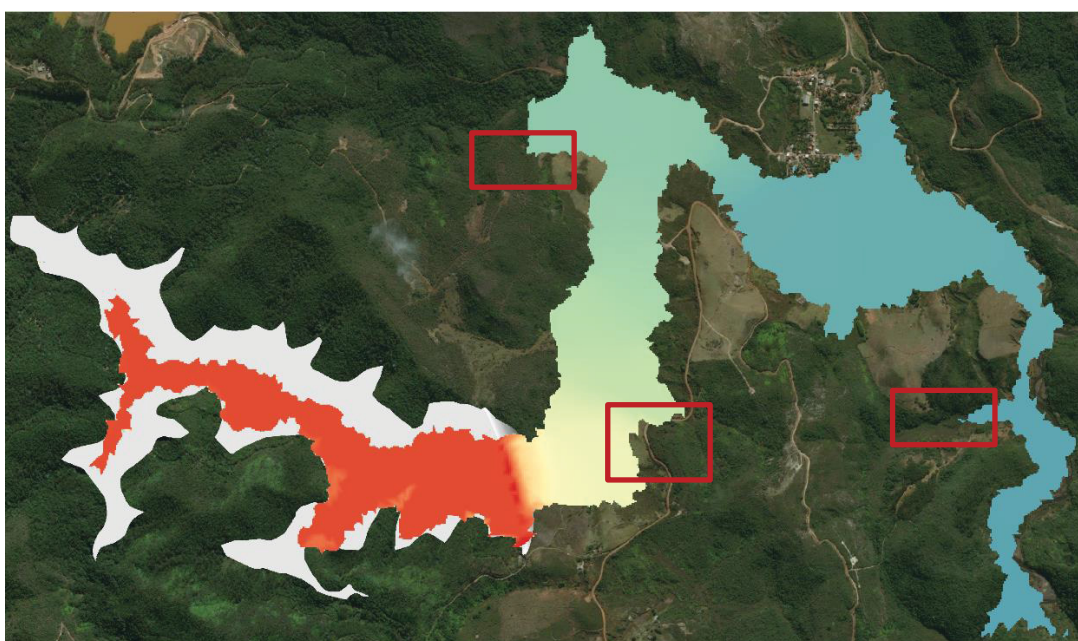
FIGURA 58 – RESULTADOS PARA ELEVAÇÃO DA COTA MÁXIMA (EM METROS) EL. 760m



FONTE: O autor (2020)

Nota-se pelas imagens que as diferenças são pequenas, porém mais acentuadas na amostra CV40, neste é possível perceber que o material não se propaga tão longitudinalmente quanto aos outros materiais, como destacado na FIGURA 59. Outro ponto são as elevações máximas, no qual para este cenário existe maiores elevações quando o cenário é comparado às outras situações. Este fato também é decorrente da dificuldade de propagação de material, portanto, ao final do escoamento vai existir uma camada maior de material sobre o terreno natural.

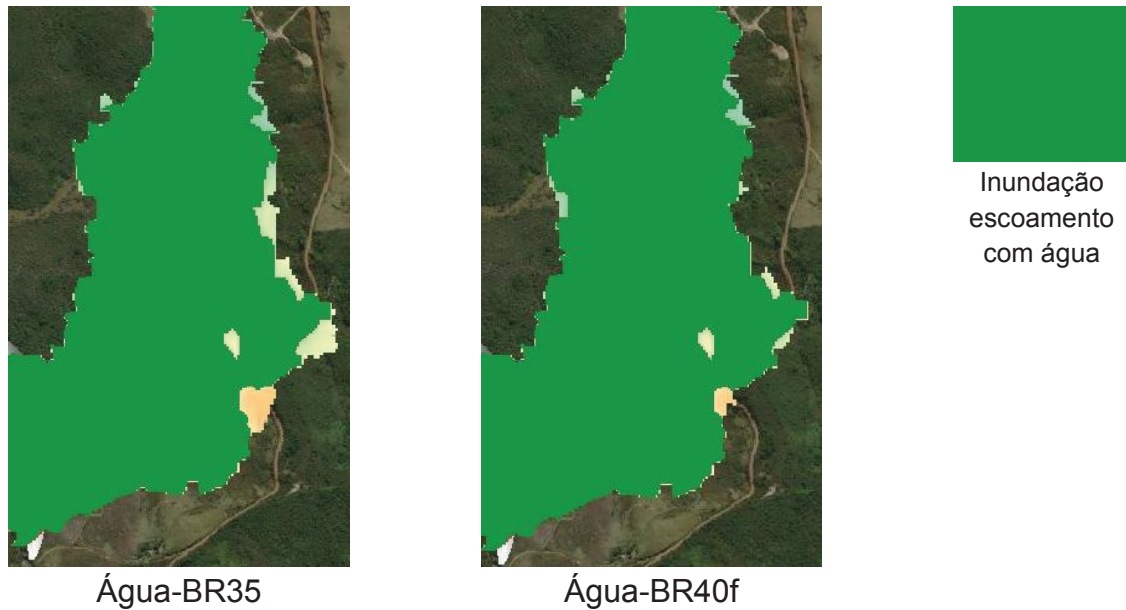
FIGURA 59 – PRINCIPAIS PONTOS DE DIFERENÇA COM OS OUTROS CENÁRIOS



FONTE: O autor (2020)

A FIGURA 60 exibe uma comparação no escoamento em termos de área inundada. Para essa elevação, as diferenças com a água são mínimas, sendo que a única com certa relevância é o caso BR35. A figura também exibe a situação BR40f para ilustrar uma situação onde as disparidades são praticamente nulas. Este cenário foi o observado em todos os casos a exceção do BR35.

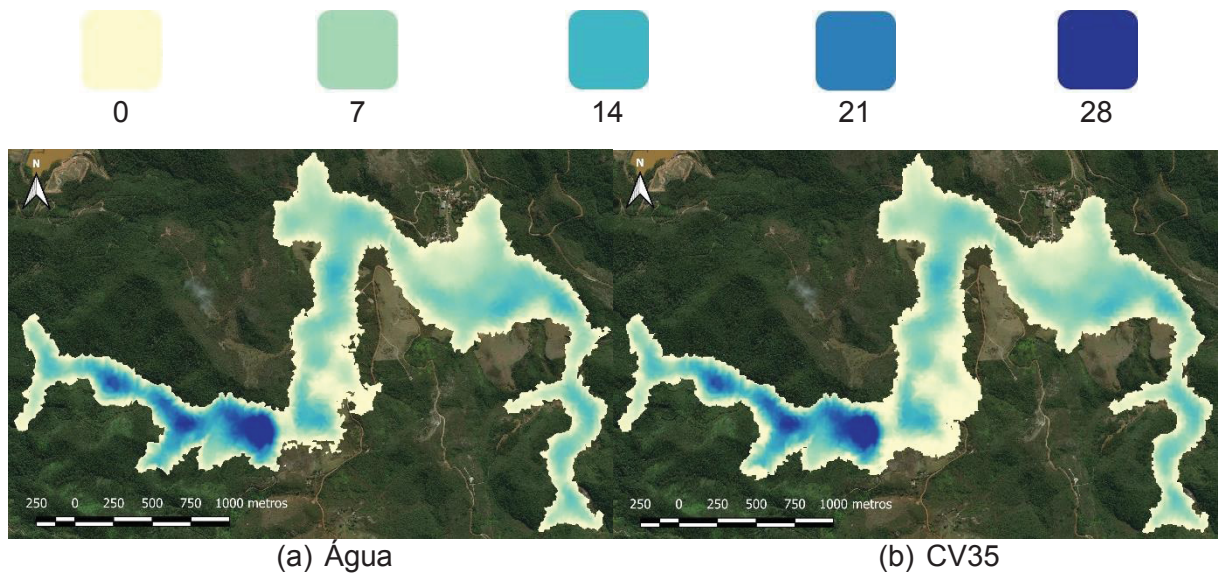
FIGURA 60 – COMPARAÇÃO INUNDAÇÃO PARA EL. 760m

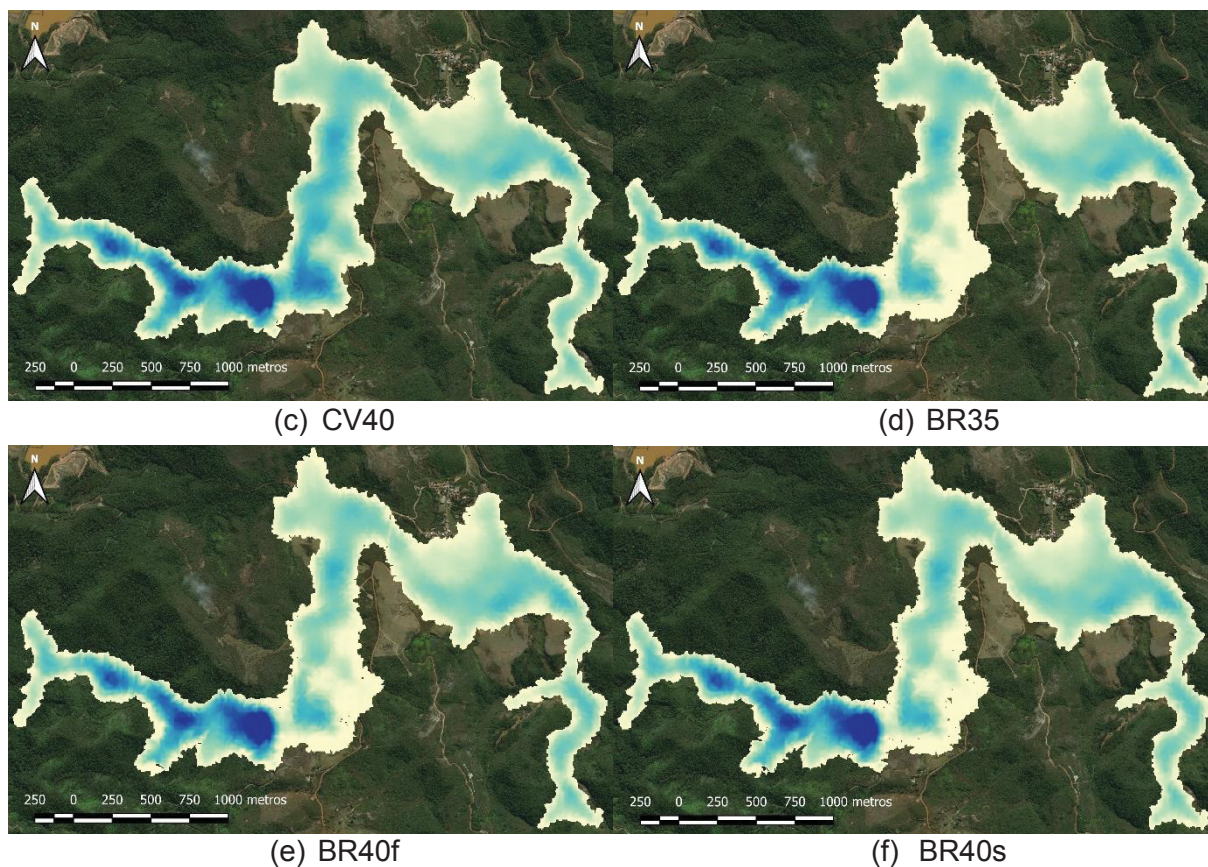


FONTE: O autor (2020)

Para as profundidades (FIGURA 61) a situação também é similar, no qual pode-se observar diferenças sutis entre os cenários em geral, porém o CV40 apresentou maiores profundidades nos trechos iniciais. Os resultados mostram que existe uma diferença de aproximadamente 7 metros de profundidade, portanto, ilustra que o escoamento mais viscoso atinge maiores alturas que os menos viscosos.

FIGURA 61 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA PROFUNDIDADE (EM METROS) PARA EL. 760m



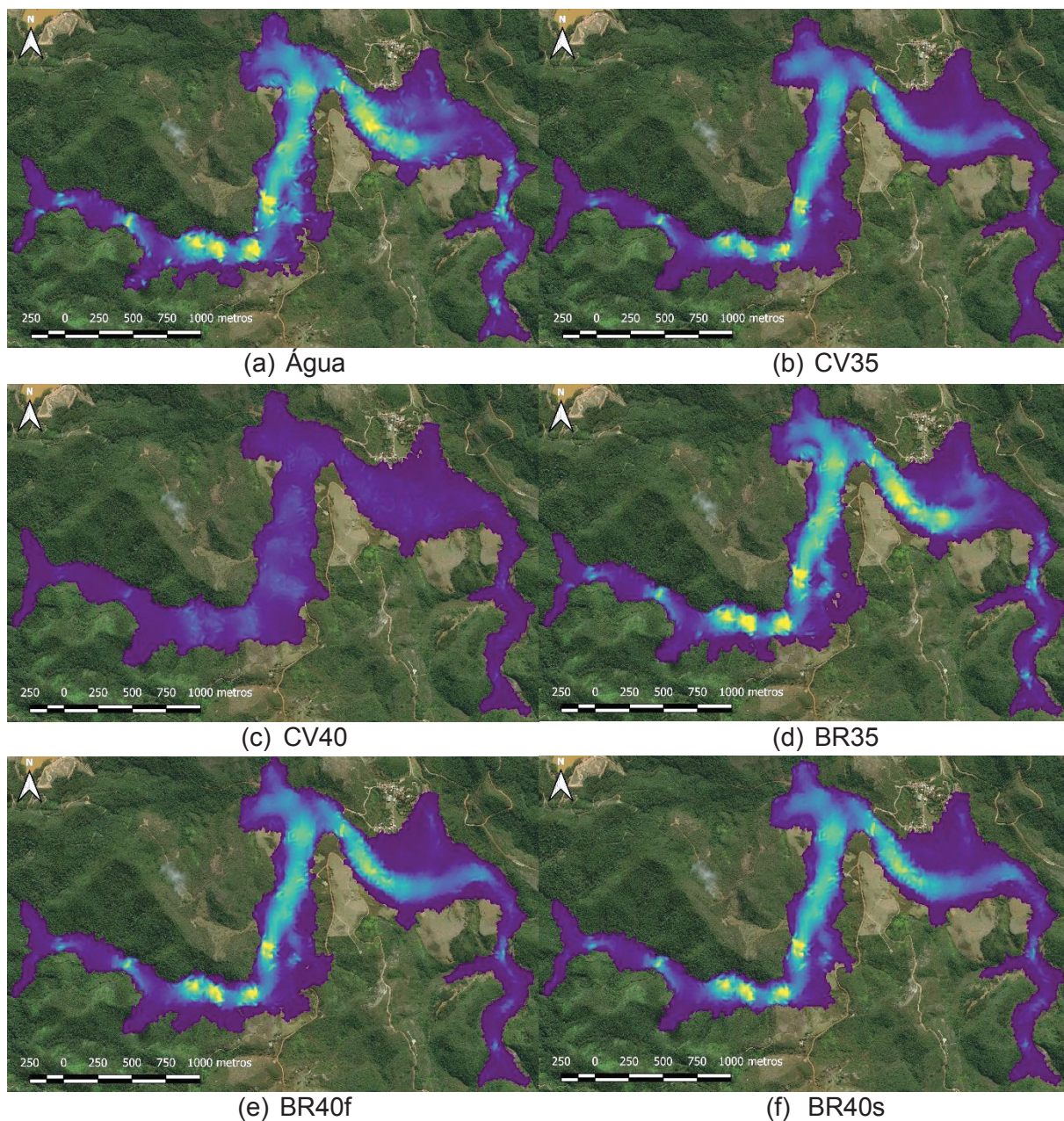


FONTE: O autor (2020)

Outro resultado obtido foi o da velocidade (FIGURA 62), nesta situação as diferenças são mais perceptíveis. Nota-se que os fluidos mais viscosos se propagam mais lentamente que o a água, fato mais perceptível quando observado a situação com CV35 e CV40. O material BR35 gerou resultados parecidos com a água, e os modelos BR40f e BR40s são bem similares entre si, sendo o modelo simplificado apresenta velocidades ligeiramente superiores no final do escoamento.

FIGURA 62 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA VELOCIDADE MÁXIMA (m/s) PARA EL. 760m





FONTE: O autor (2020)

Nota-se que um material muito mais viscoso como o caso do CV40 gera velocidades bem inferiores. Entretanto, para analisar o real risco hidrodinâmico é necessário agregar à análise os resultados de profundidade. A seguir são apresentados os resultados do risco hidrodinâmico sobre a óptica do risco para perda de vidas humanas (FIGURA 63), apresentados na TABELA 1.

FIGURA 63 – RESULTADOS NUMÉRICOS DO RISCO HIDRODINÂMICO (m^2/s) PARA EL. 760m



$\leq 0,50$



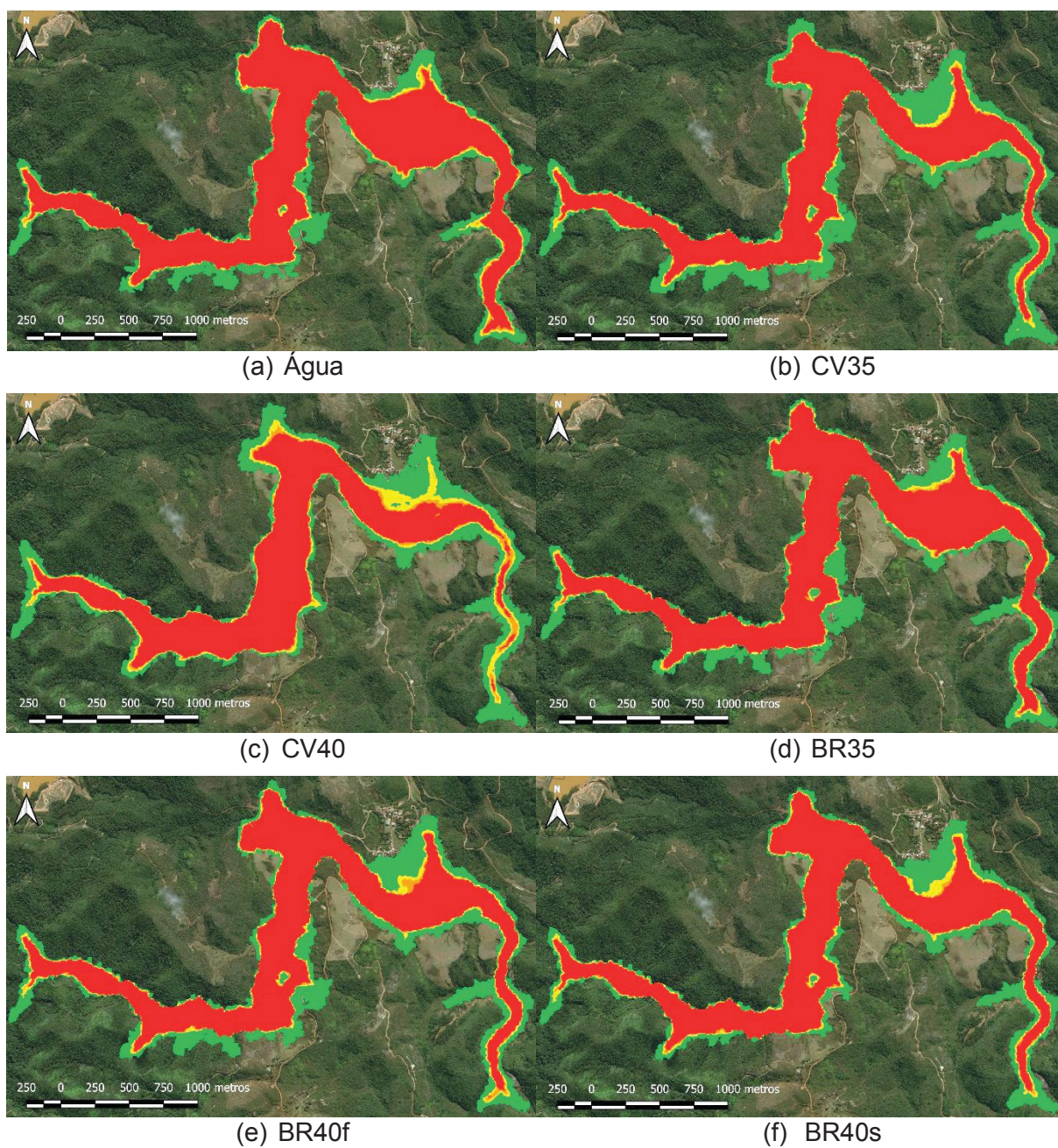
0,5 – 0,75



0,75 – 1,0



> 1,0

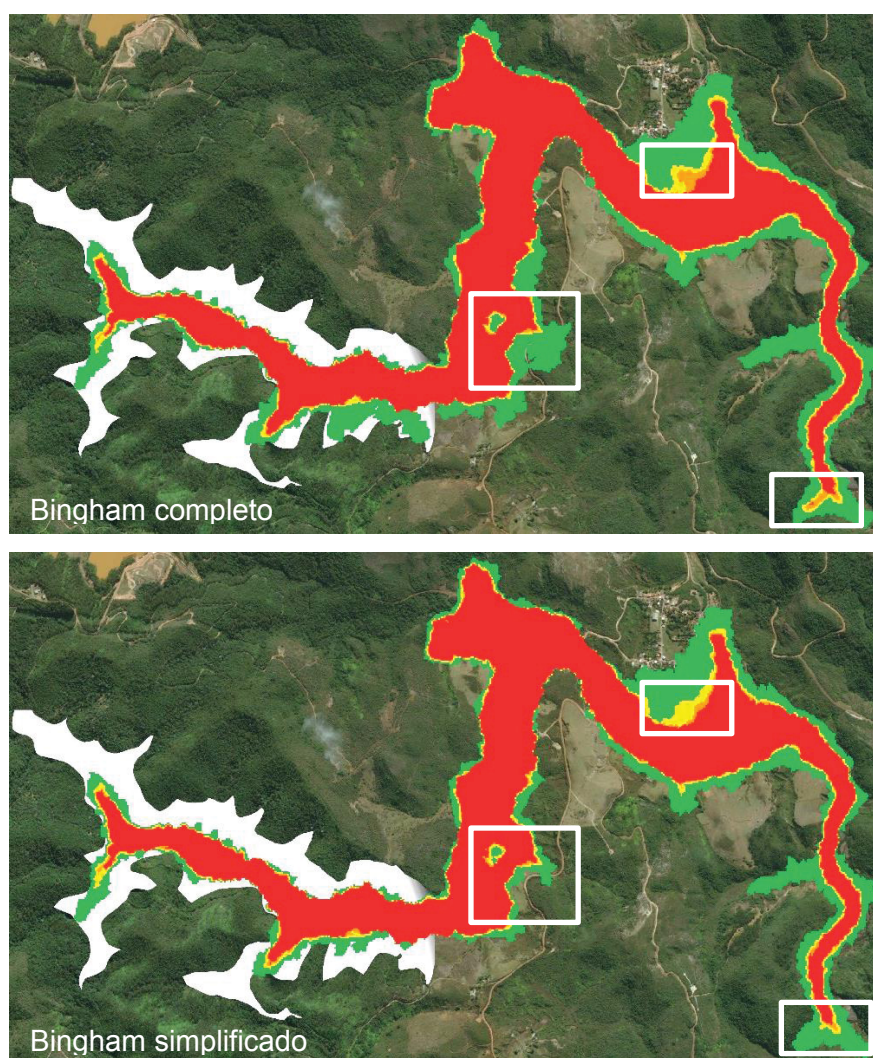


FONTE: O autor (2020)

Nota-se pela imagem que o CV40 apresenta um risco mais largo no início, chegando a cobrir pontos que não são englobados nas outras análises, entretanto quanto mais a jusante da barragem pode-se perceber que o risco fica menor comparado às outras situações. Quanto mais distante da barragem, a água se mostra como o pior cenário, oferecendo mais risco a perda de vidas humanas, sendo que o mais próximo dessa situação é a análise BR35. Ressalta-se que independente da circunstância, em todos existe uma grande área de perigo à vida humana.

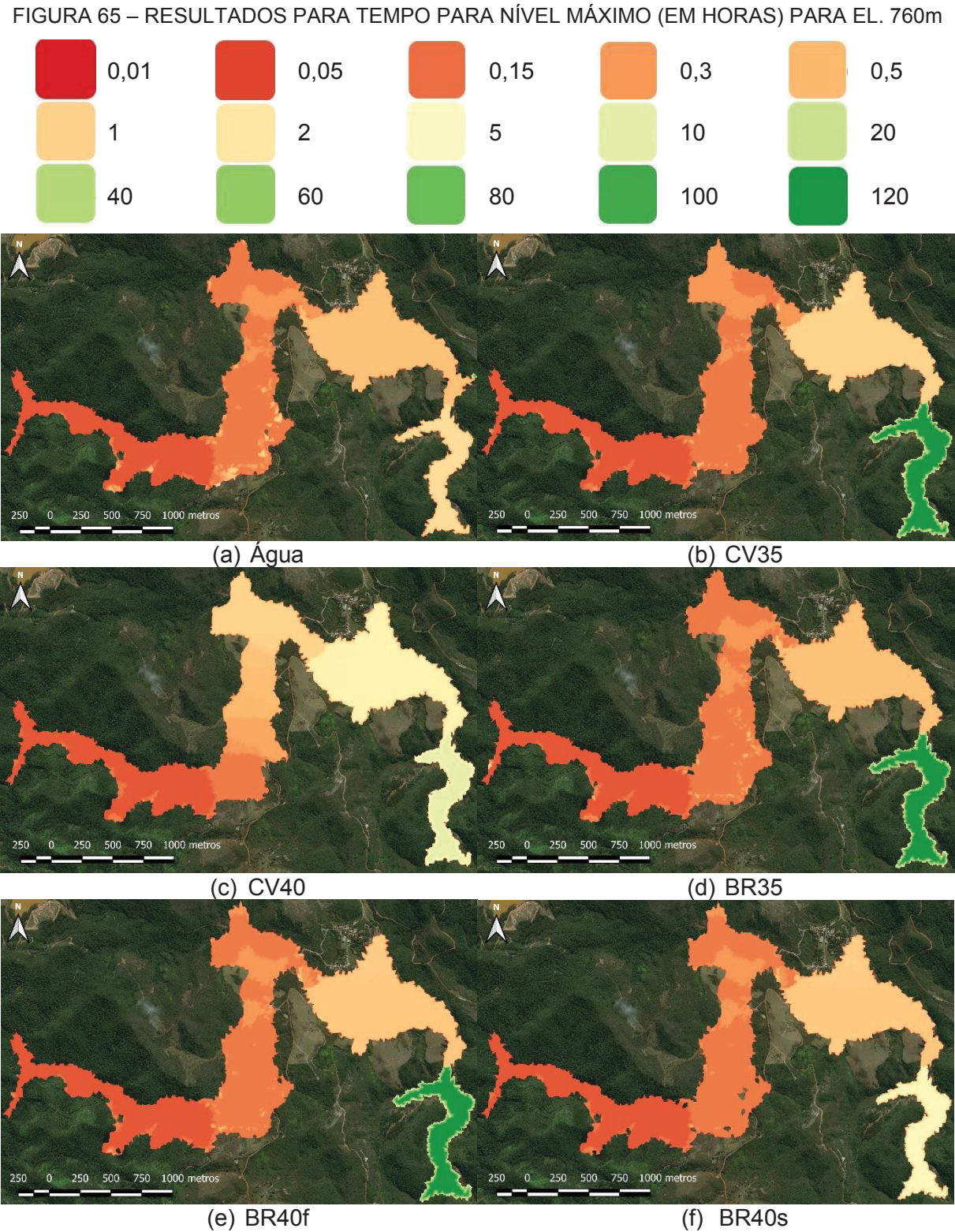
Os casos BR40f e BR40s mostram algumas diferenças no risco hidrodinâmico, essas são apontadas na FIGURA 64. Percebe-se que no modelo de Bingham completo existe uma zona na qual o fluido se propaga com uma relação de velocidade e altura de escoamento maior que no caso de Bingham simplificado. Outro ponto é que existe uma zona onde o material consegue escoar (BR40f) e no cenário BR40s não. Além disso existe uma espécie de “ilha” no qual o cenário simplificado consegue avançar mais. Essas diferenças em uma situação real poderiam significar o óbito ou não de uma pessoa.

FIGURA 64 – DIFERENÇAS ENTRE OS MODELOS DE BINGHAM COMPLETO E SIMPLIFICADO PARA O MATERIAL DE BRUMADINHO/MG



FONTE: O autor (2020)

Outra informação que deve ser associada com os dados anteriores é o tempo de chegada para o nível máximo, ou seja, a partir da ruptura quanto tempo demora até que o nível chegue ao pico (FIGURA 65).



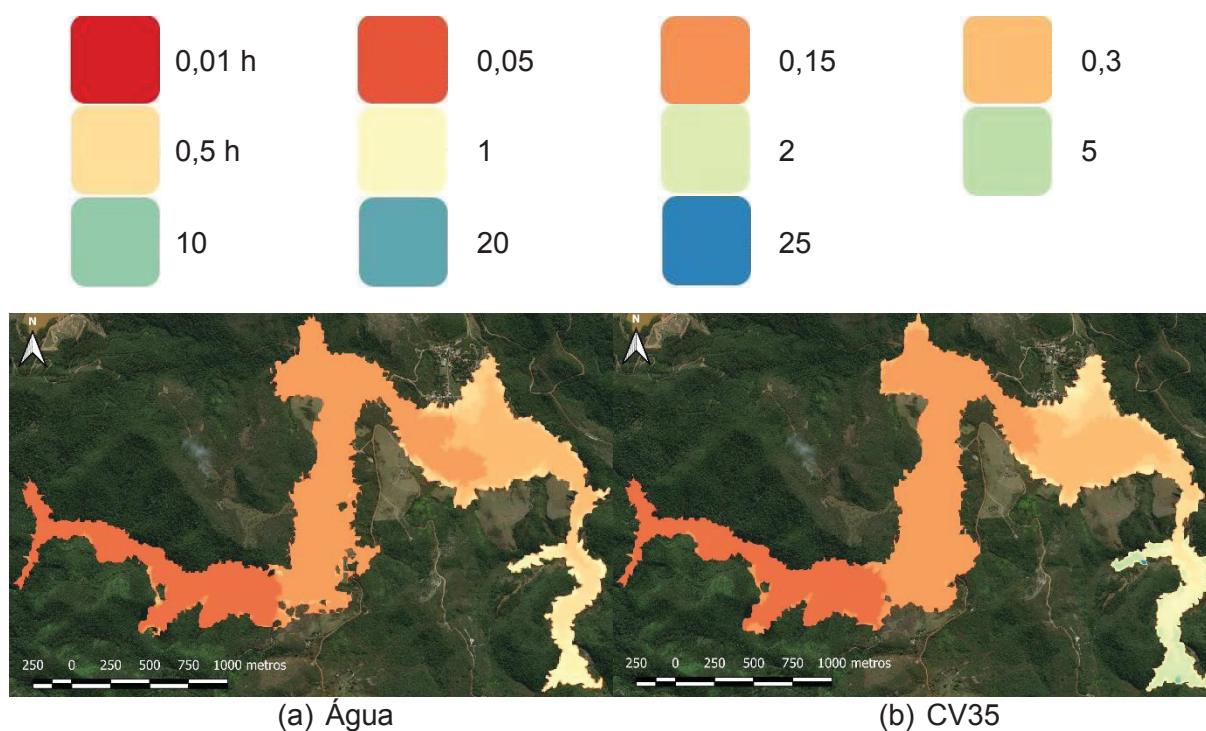
FONTE: O autor (2020)

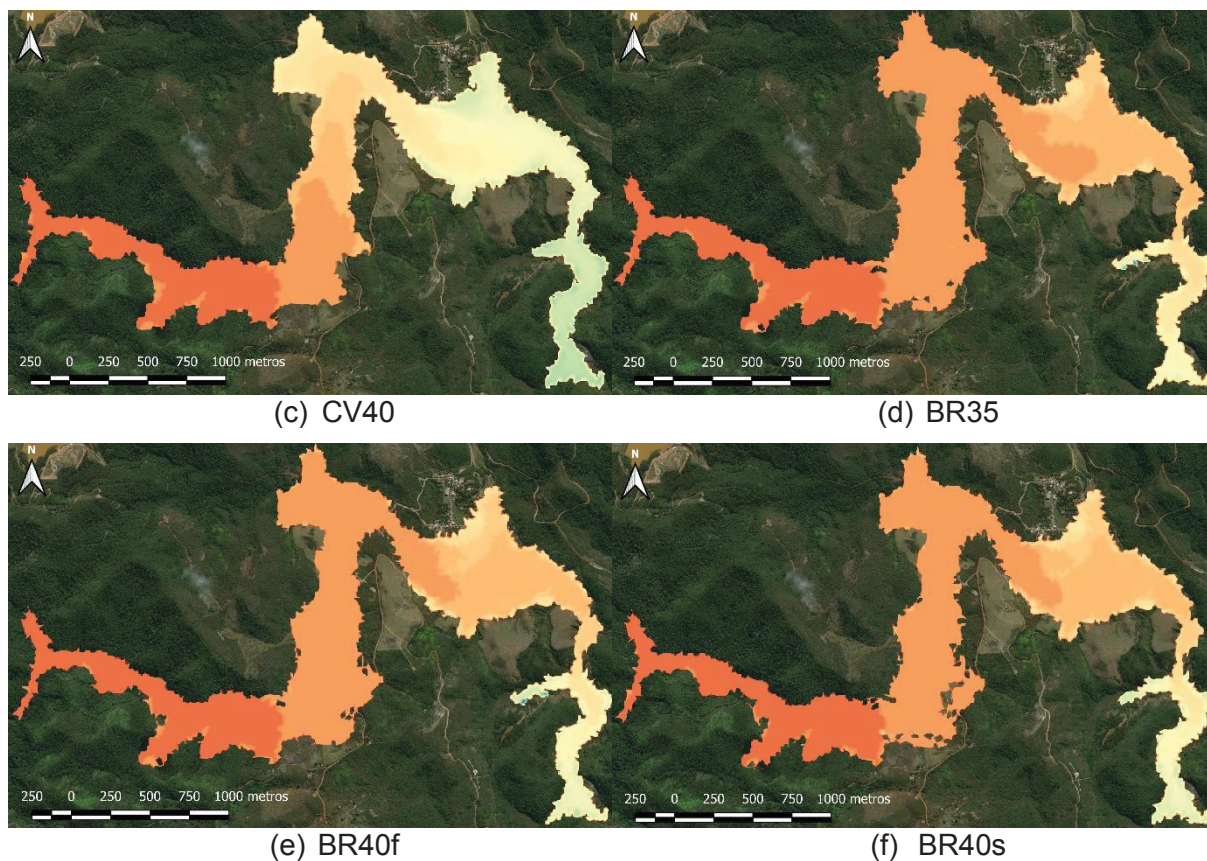
O material mais viscoso, no caso CV40, foi o que mais demorou para se propagar, resultado esperado visto que as velocidades dos escoamentos (FIGURA 62). Nos primeiros quilômetros, nota-se que o tempo para o CV40 chega a ser 4 vezes maior (0,5 para 2 horas). Para uma população a jusante, isso representaria a diferença entre a região estar na ZAS (zona de autossalvamento) e um tempo extra de 1,5h para evacuar a residência.

Para as outras situações as diferenças são mais sutis, à exceção do trecho final. Essa diferença pode ser ocasionada pela maneira como o material escoar e a profundidade que ele vai atingir. Em alguns trechos, por esta profundidade ser mais rasa, o tempo pode ser mais curto, quando comparada a outra que atinge um nível maior.

A última situação a ser apresentada é o tempo para a chegada da onda (FIGURA 66) que consiste em quanto tempo demora até que o nível de água comece a subir, o qual difere do tempo para o nível máximo. Este é um pouco mais acurado para garantir a segurança das pessoas na hora da evacuação, visto que muitas rotas de fuga podem começar a ser submersas, mesmo com uma lâmina de fluido pequena, o que atrapalha no deslocamento das pessoas.

FIGURA 66 – RESULTADOS PARA TEMPO CHEGADA DA ONDA (EM HORAS) PARA EL. 760m





FONTE: O autor (2020)

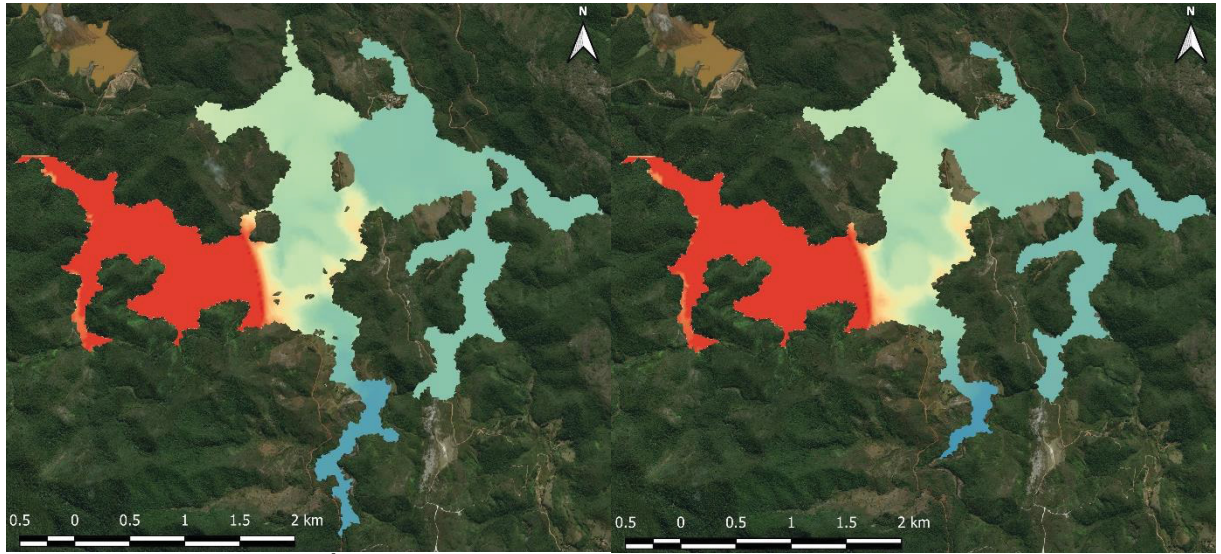
Novamente a condição CV40 apresentou maiores tempos que as outras, apresentando tempos entre 2 e 5 horas para atingir as regiões no final do escoamento. No início desse cenário os tempos podem ser até 6 vezes maiores (0,15 horas para 1h). Nota-se na EL. 760m que o CV35 também apresenta tempos superiores aos outros, variando de 1 a 2 horas ao final do escoamento. Já as outras situações apresentam tempo de chegada da onda similares.

4.2 BARRAMENTO COM EL. 790M

Os resultados para a elevação máxima de água/rejeito são apresentados na FIGURA 67. A região em branco indica a localização do barramento e do reservatório.

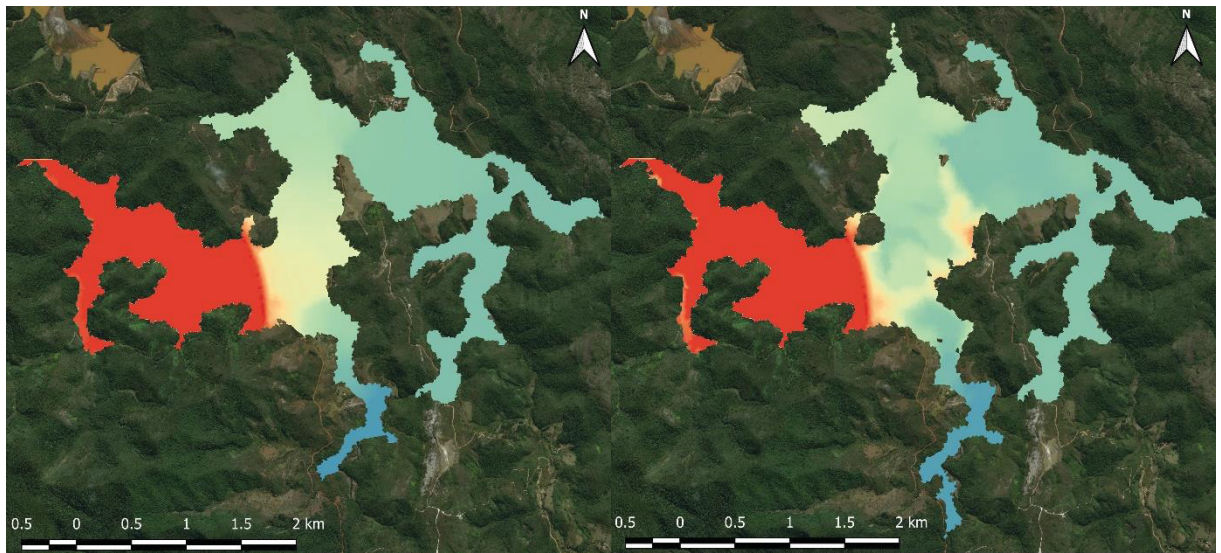
FIGURA 67 – RESULTADOS PARA ELEVAÇÃO DA COTA MÁXIMA (EM METROS) EL. 790m





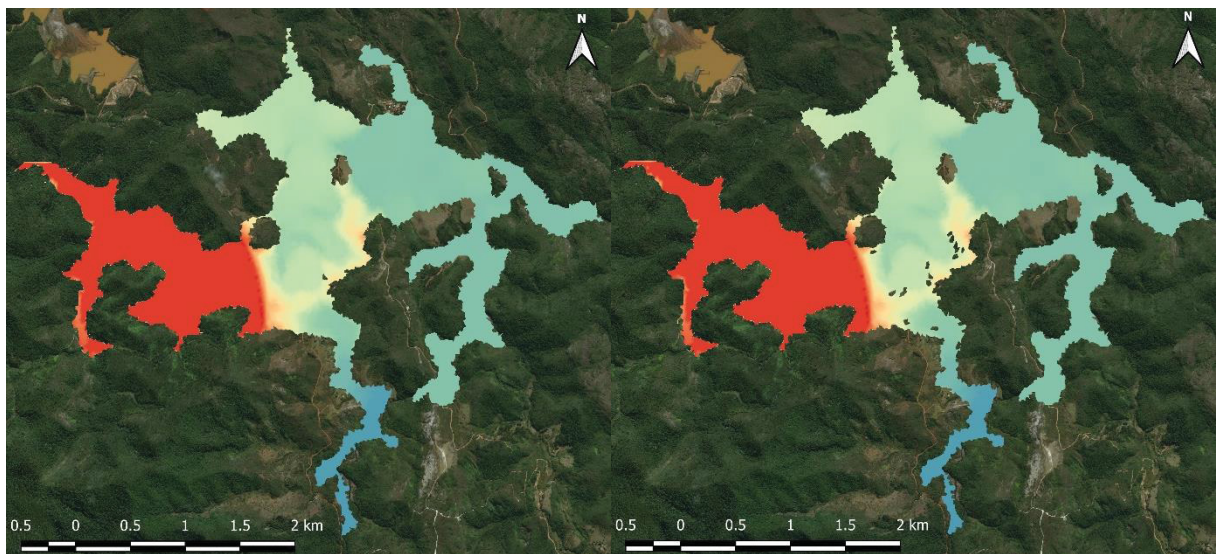
(a) Água

(b) CV35



(c) CV40

(d) BR35



(e) BR40f

(f) BR40s

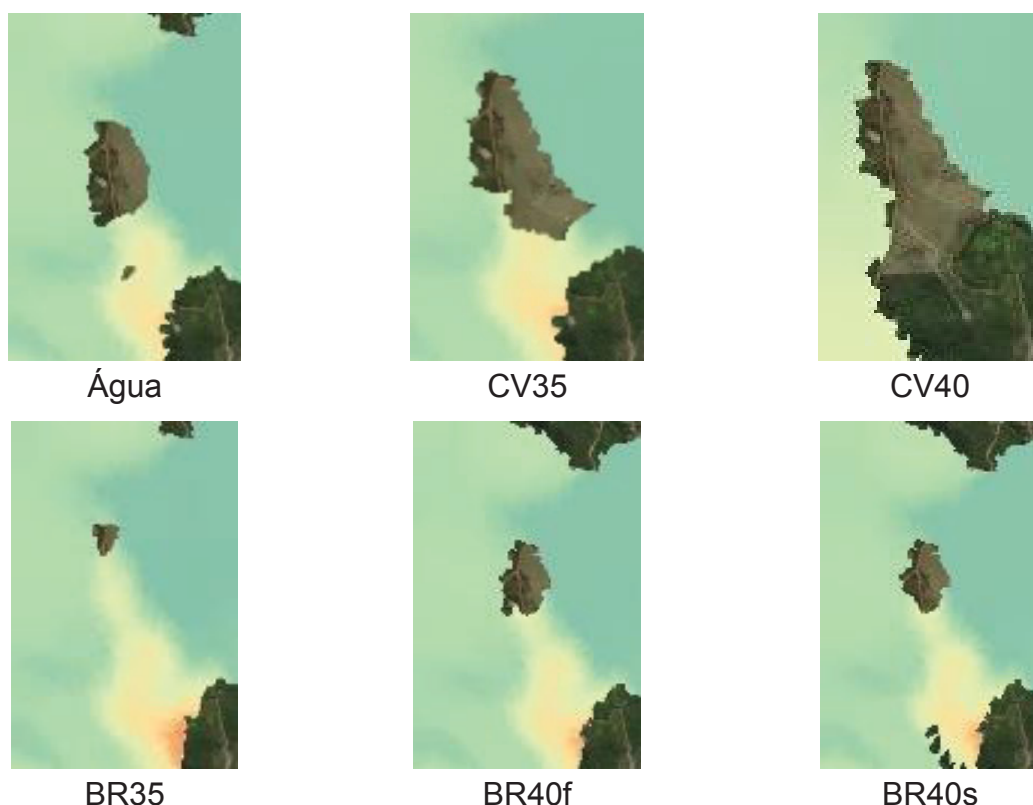
FONTE: O autor (2020)

A primeira observação a ser descrita é que para a comparação dos resultados da amostra de Brumadinho/MG usando os modelos de Bingham completo e simplificado mostrou que os resultados foram muito similares. Isso demonstra uma paridade entre os modelos para a situação apresentada.

Outro item a ser abordado é que os materiais menos viscosos percorrem uma distância maior, principalmente para a região norte e sul, sendo que a oeste a propagação parou praticamente no mesmo local em todas as análises. Entretanto, deve ser destacado é que para o CV40 atinge cotas mais altas para o nível de fluido.

Pela FIGURA 67 nota-se que conforme o tipo do material, existe uma espécie de “ilha” no qual seu tamanho muda conforme o fluido. No CV40, essa região não inundada não existe, pois o material não chega a formar essa zona. Já para BR35 essa zona foi praticamente encoberta pelo fluxo. A FIGURA 68 ilustra o descrito.

FIGURA 68 – DETALHE COMPARATIVO DOS RESULTADOS PARA ELEVAÇÃO DA COTA MÁXIMA (EM METROS) EL. 790m

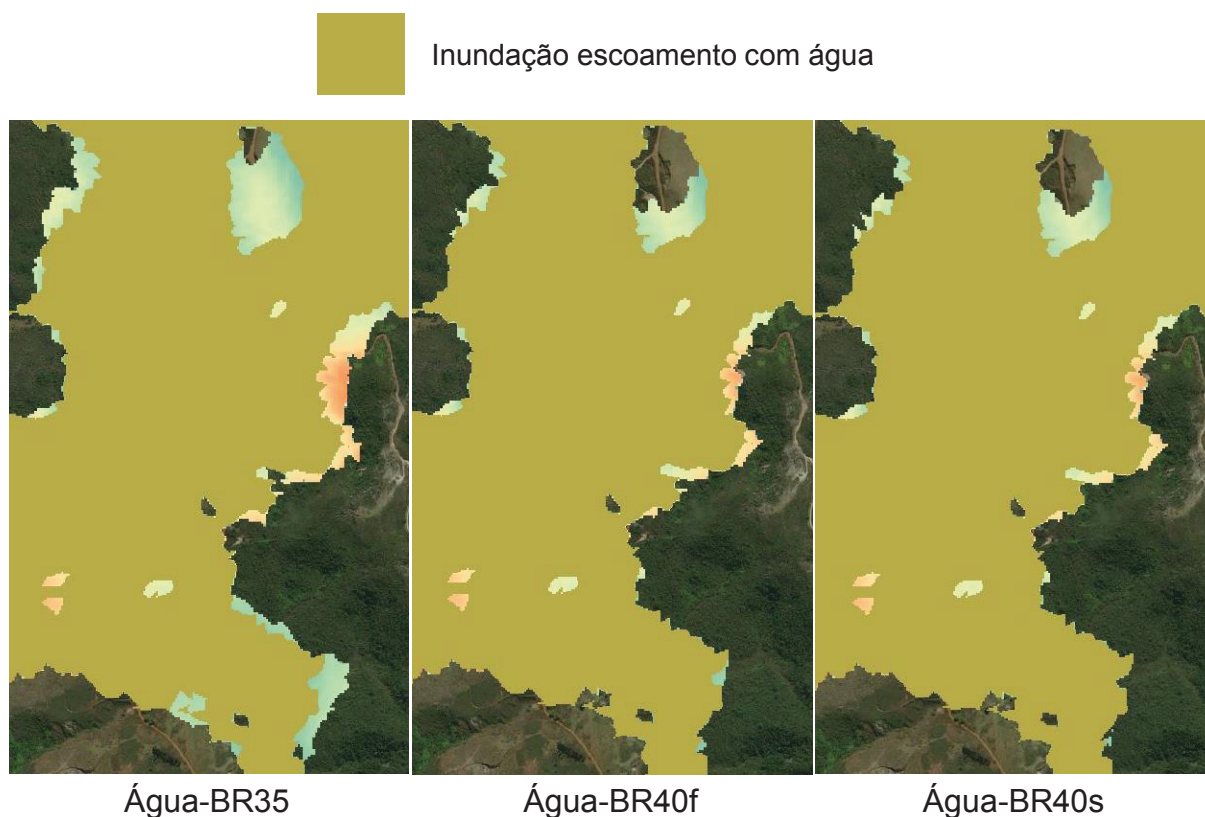


FONTE: O autor (2020)

Pelas imagens pode-se notar que existe uma espécie de estrada que é submersa nas condições, exceto no CV40. Portanto, existiria uma rota de fuga mais extensa nesta situação, o que pode auxiliar na evacuação de pessoas.

Comparando os resultados obtidos com a água, três cenários se destacaram, no caso a comparação com o BR35, BR40f e BR40s. Esse comparativo é ilustrado pela FIGURA 69. Observa-se que o BR-35 consegue se propagar mais lateralmente que a água, gerando uma área maior no início (próximo ao barramento), além disso, o BR40f e BR40s também geram o mesmo efeito, porém em menor intensidade. Comparando esses dois últimos, nota-se que os resultados no comparativo com a água são bem parelhos, com leves diferenças entre eles.

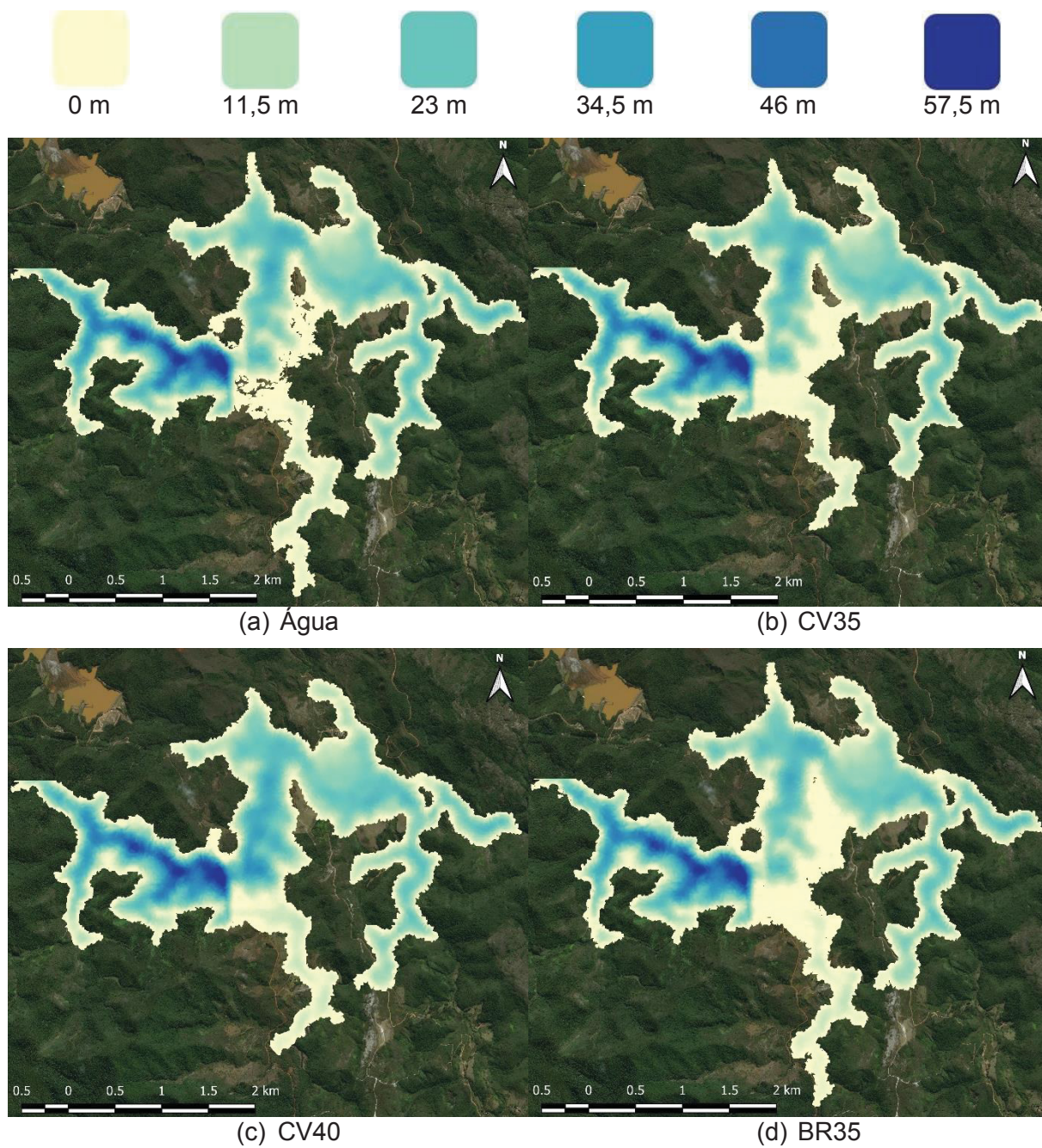
FIGURA 69 – COMPARAÇÃO INUNDAÇÃO EL. 790m

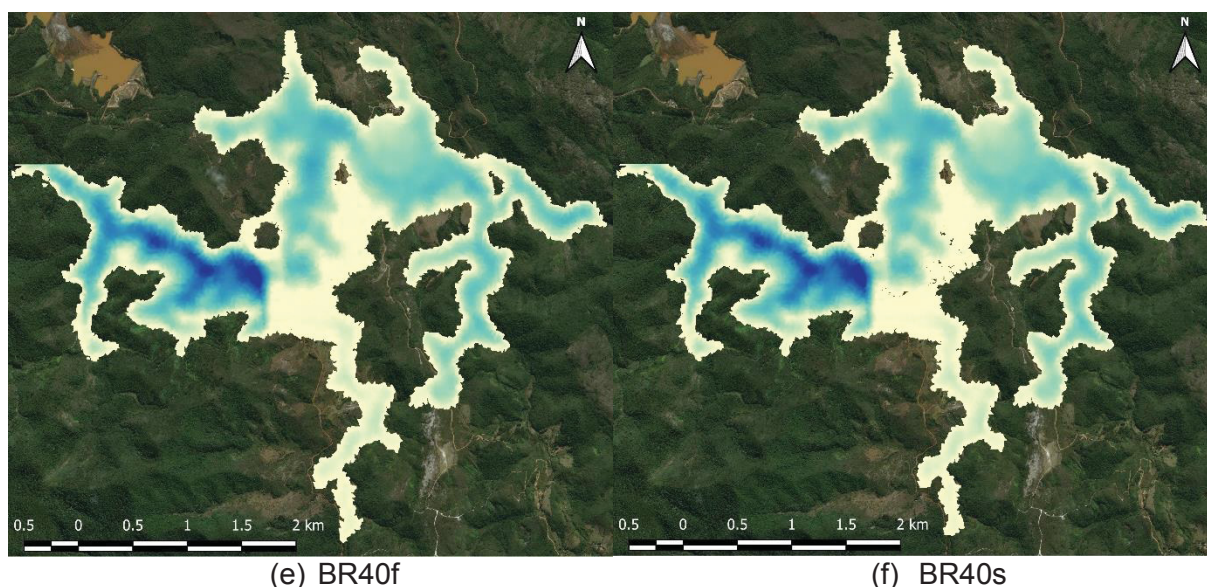


FONTE: O autor (2020)

A próxima análise é com relação a profundidade, na qual se pode verificar detalhes sobre a altura de escoamento não identificados nas figuras anteriores.

FIGURA 70 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA PROFUNDIDADE (EM METROS) PARA EL. 790m





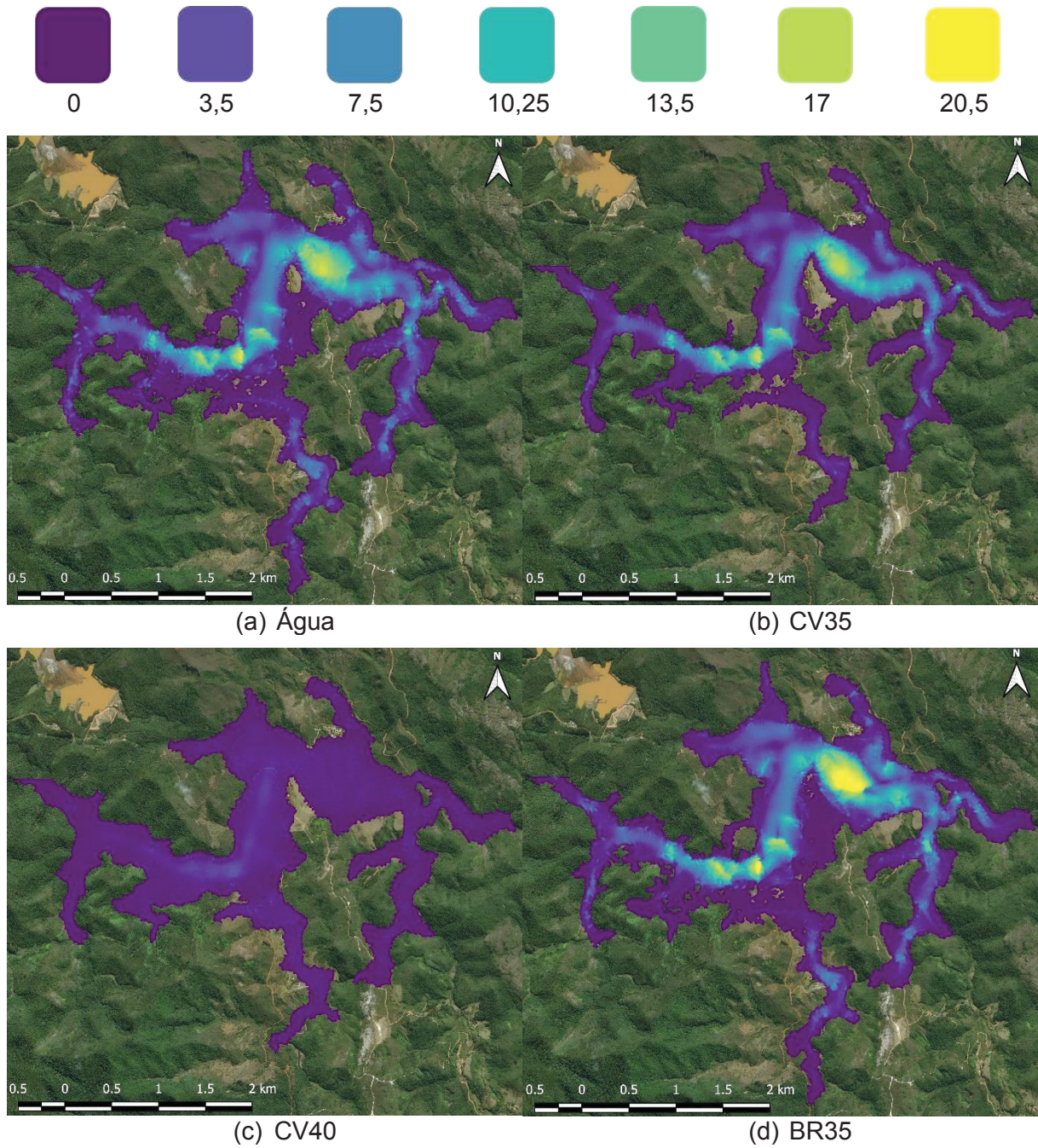
FONTE: O autor (2020)

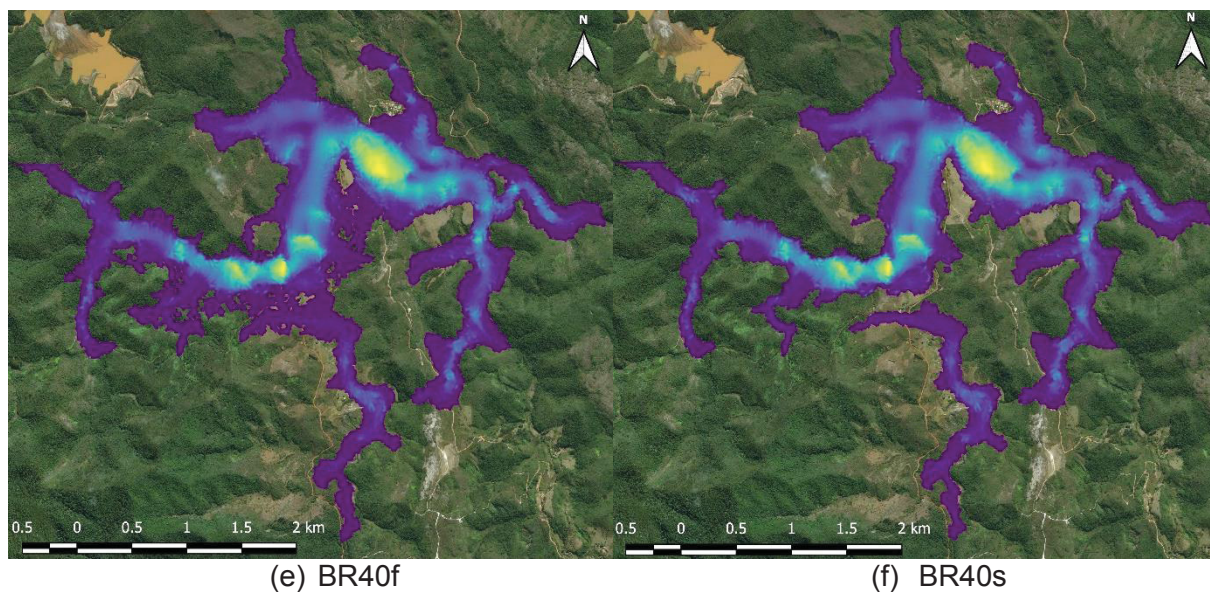
Novamente é possível verificar que existe uma região mais escura a jusante da barragem para CV40, representando uma maior profundidade. Apesar disso, como citado, o material se propagou menos, porém em uma eventual ruptura, a camada de material depositado com Cv de 40% será maior. Outro ponto já comentado é que os modelos de Bingham completo e simplificado com concentração volumétrica de 40% apresentam resultados muito similares para a profundidade.

O próximo item a ser verificado são as velocidades, ilustradas pela FIGURA 71. Nessa situação é possível notar que o CV40 novamente possui valores menores, como já era esperado. Outro ponto em comum é que o material BR35 é o mais similar à água e que as diferenças entre os modelos de Bingham para as amostras de Brumadinho/MG com Cv 40% não apresentam disparidades significativas nos resultados.

É interessante comparar os resultados do CV35 com os do BR35. Observe que o BR35 possui um trecho a jusante com maior velocidade do que a observada pelo CV35. Nos dois casos as tensões iniciais de escoamento são próximas (6,35 Pa e 5,73 Pa, respectivamente), entretanto, as diferenças na viscosidade (700 Pa.s contra 119,37 Pa.s) e na densidade do material (2970 kg/m³ contra 3715 kg/m³) geraram, em um trecho, velocidades visivelmente superiores no caso CV35.

FIGURA 71 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA VELOCIDADE MÁXIMA (m/s) PARA EL. 790m

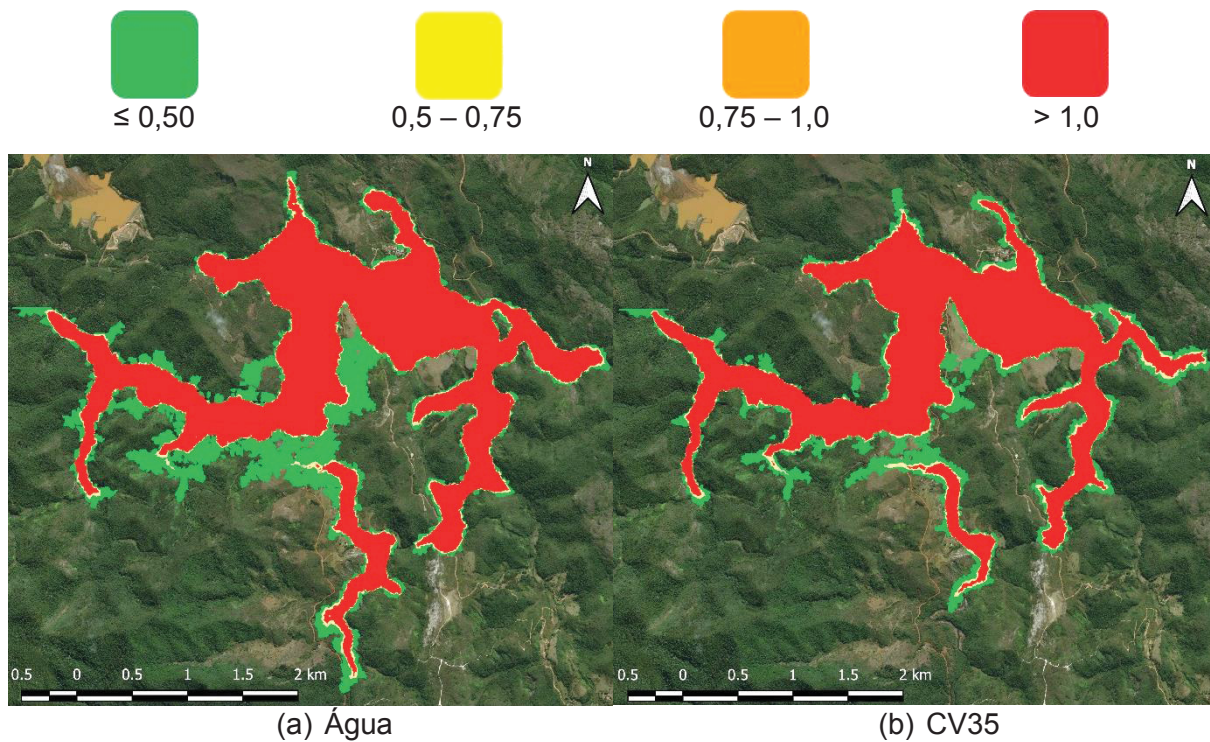


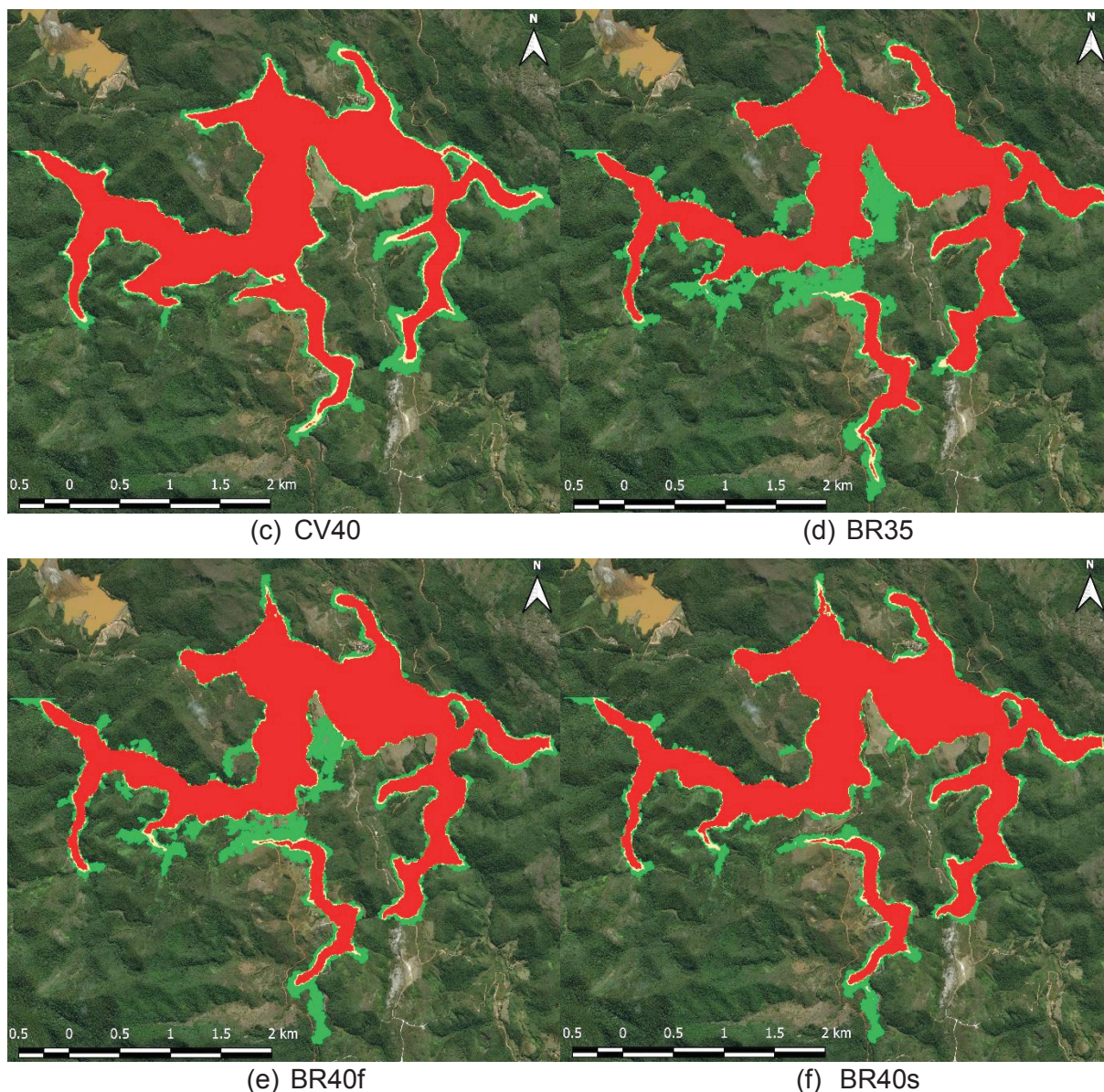


FONTE: O autor (2020)

A FIGURA 72 apresenta os resultados relacionados ao risco hidrodinâmico, sempre visando os seres humanos.

FIGURA 72 – RESULTADOS NUMÉRICOS DO RISCO HIDRODINÂMICO (m^2/s) PARA EL. 790m



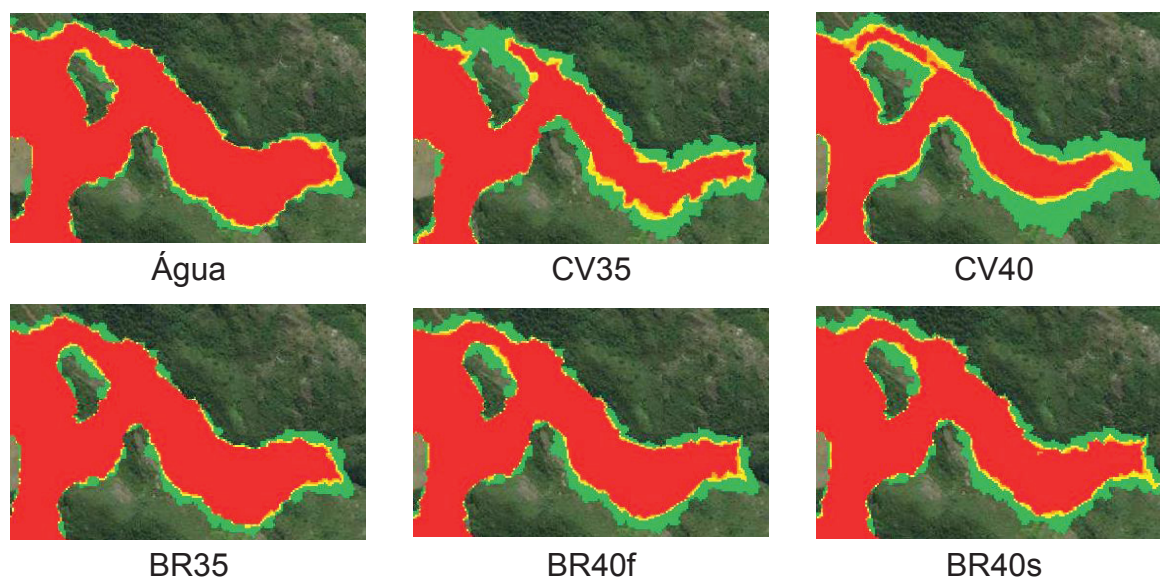


FONTE: O autor (2020)

Em termos de risco, nota-se os modelos de Bingham completo e simplificado apresentam praticamente os mesmos resultados, não apresentando nenhuma diferença significativa para a situação apresentada. Além disso, o escoamento para o sul atinge uma distância maior, quando comparado com os materiais mais viscosos.

Já para as outras análises, observando-se o escoamento na região leste, é possível notar que para os materiais menos viscosos existe um risco hidrodinâmico com mancha mais larga, como destacado na FIGURA 73. Esse efeito é mais perceptível nas amostras CV35 e CV40

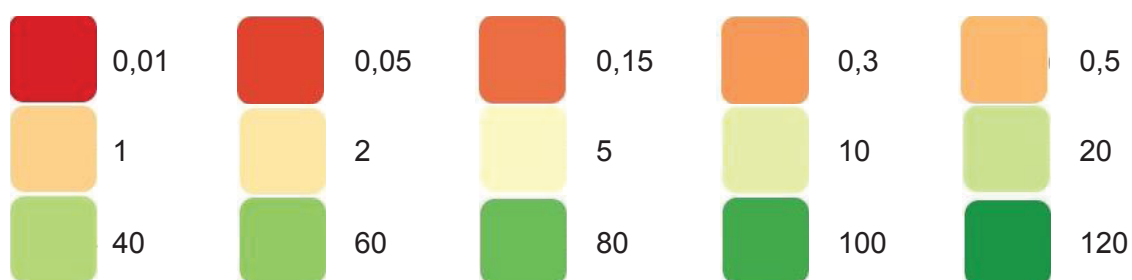
FIGURA 73 – DETALHE COMPARATIVO PARA O RISCO HIDRODINÂMICO NA EL. 790m

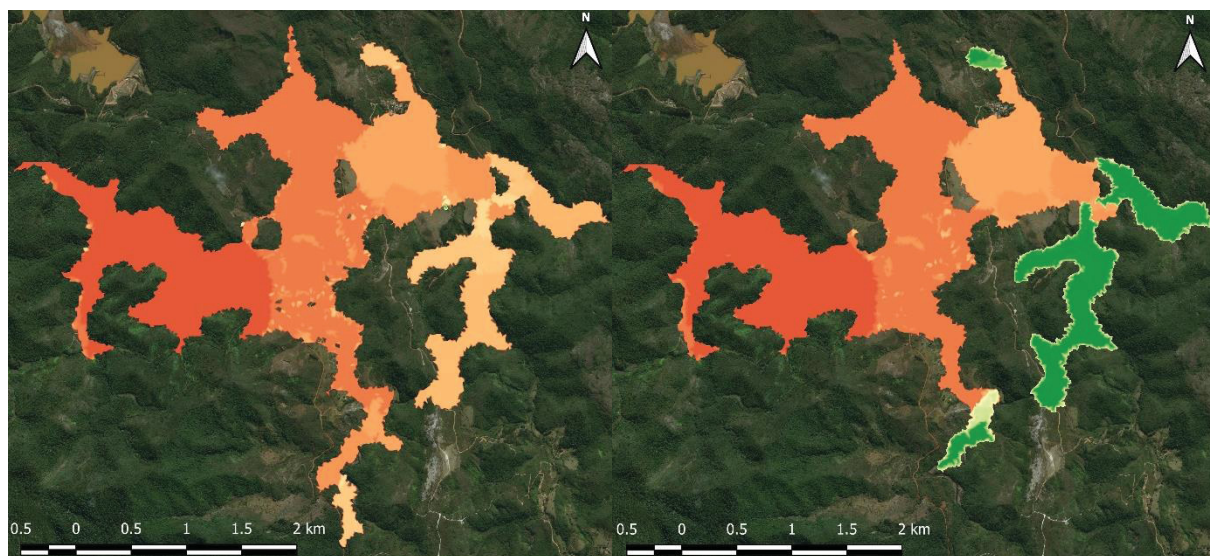


FONTE: O autor (2020)

Para auxiliar as ações de emergência em uma eventual ruptura, são elaboradas análises para estabelecer o tempo de chegada do nível de elevação máximo, apresentados na FIGURA 74. Nesta, verifica-se que o material com os menores tempos é a água, seguido pelo BR35. Além disso, existem algumas zonas nas análises que, conforme a situação aplicada apresenta, diferenças nos tempos são mais acentuadas.

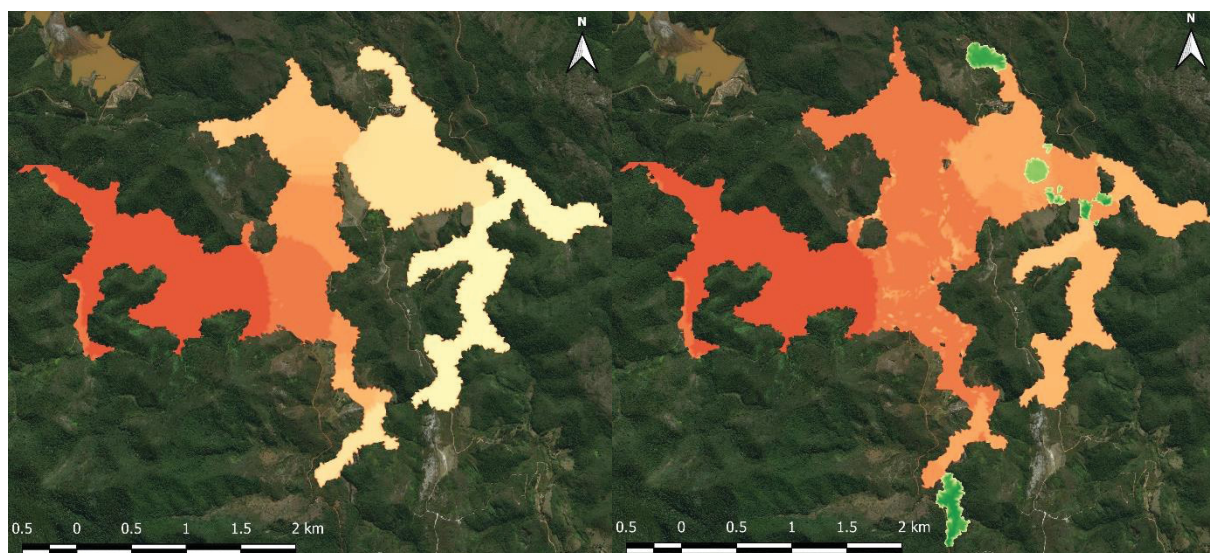
FIGURA 74 – RESULTADOS PARA TEMPO PARA NÍVEL MÁXIMO (EM HORAS) PARA EL. 790m





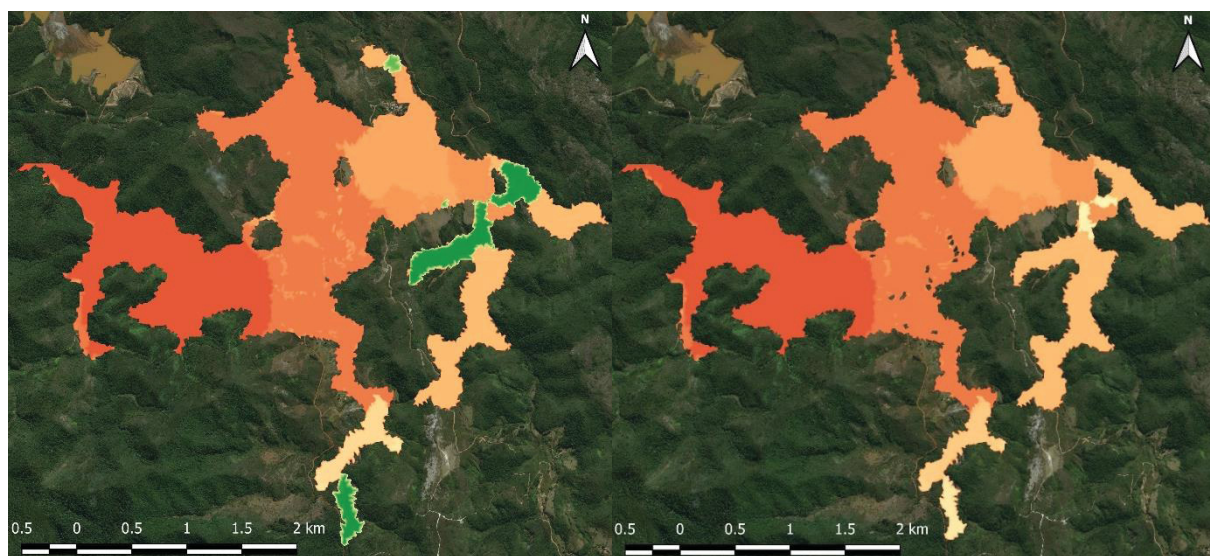
(a) Água

(b) CV35



(c) CV40

(d) BR35



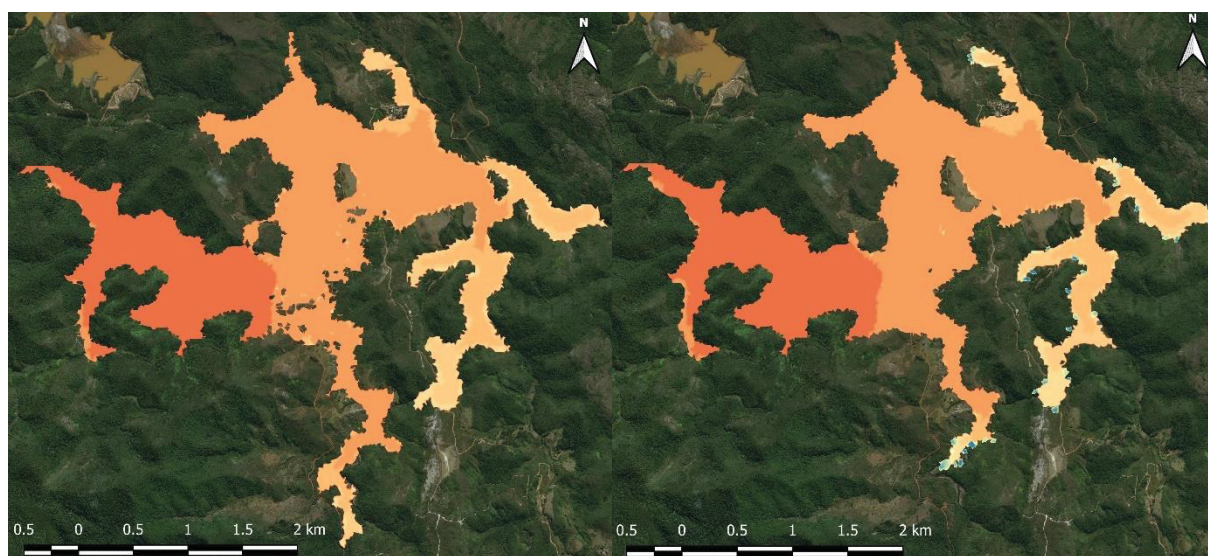
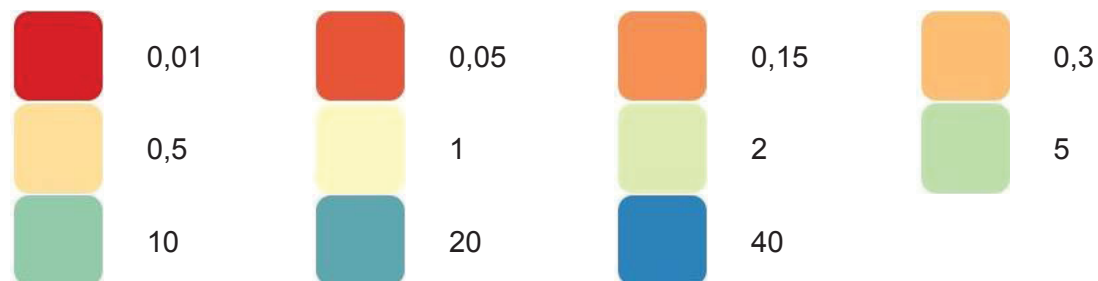
(e) BR40f

(f) BR40s

FONTE: O autor (2020)

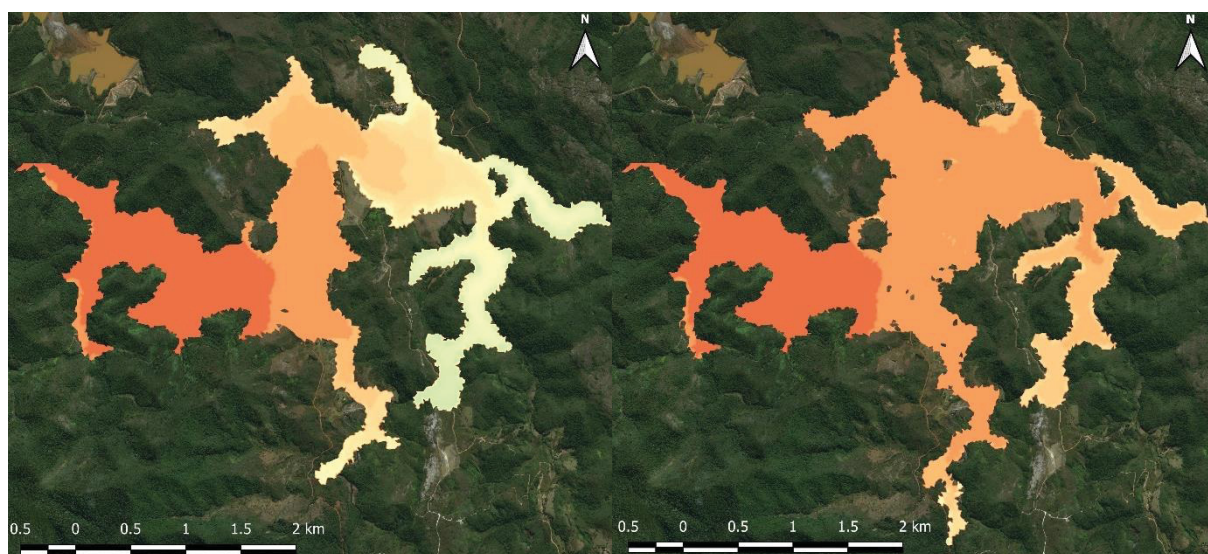
Por último é apresentado o tempo de chegada da onda (FIGURA 75), um parâmetro que auxilia a se prever rotas de fuga.

FIGURA 75 – RESULTADOS PARA O TEMPO CHEGADA DA ONDA (HORAS) PARA EL. 790m



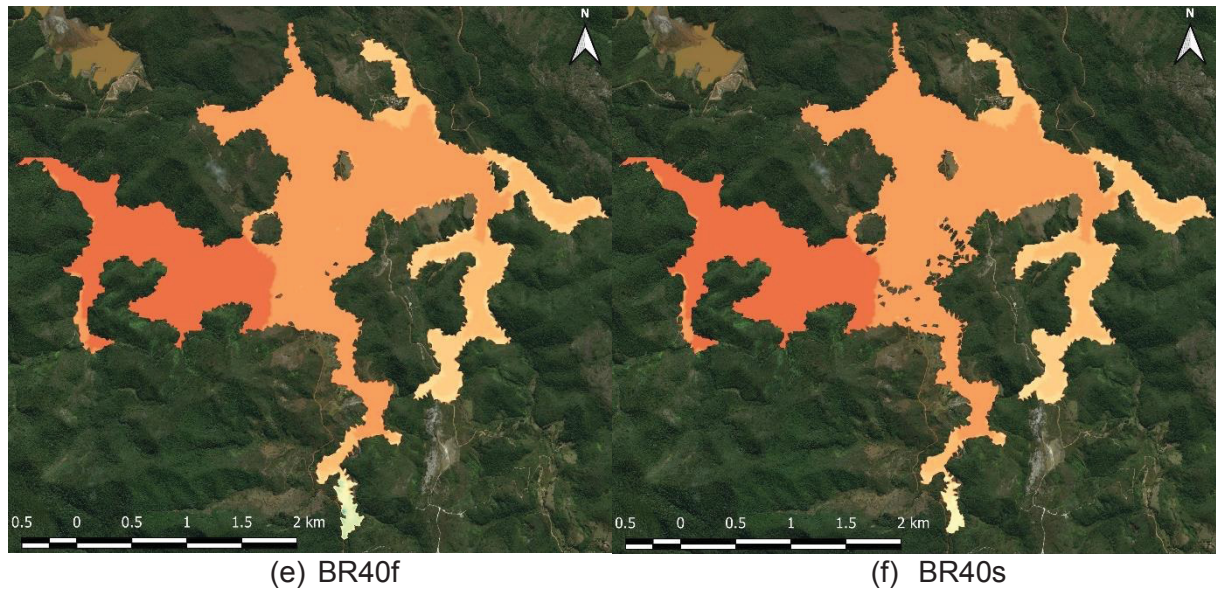
(a) Água

(b) CV35



(c) CV40

(d) BR35



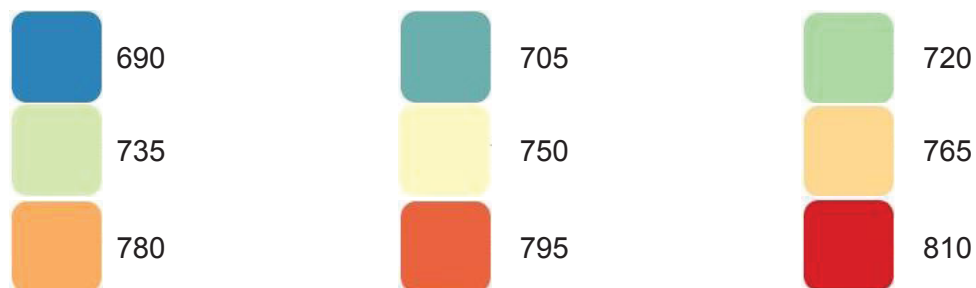
FONTE: O autor (2020)

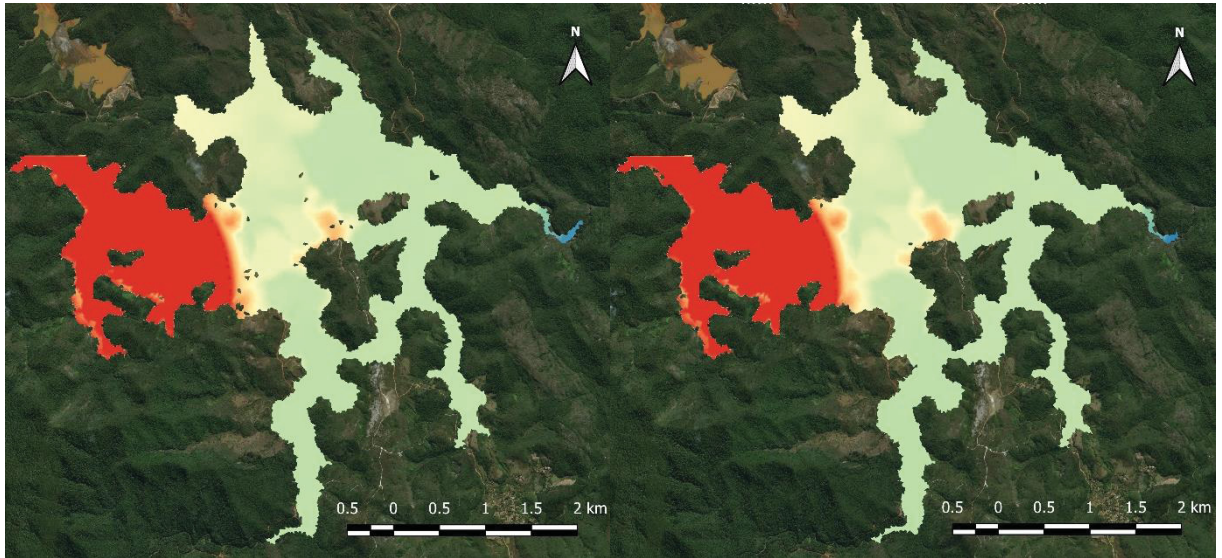
Nota-se pelas imagens que quanto mais difícil é a propagação do material, maior o tempo para chegada da onda. Além disso, para um mesmo instante de tempo, esses materiais menos viscosos chegam a percorrer 700 metros a mais do que o CV40, por exemplo.

4.3 BARRAMENTO COM EL. 810M

Com o aumento da elevação do material, as diferenças começam a ficar mais perceptíveis, como será apresentado a seguir. A FIGURA 76 ilustra a elevação da cota máxima atingida.

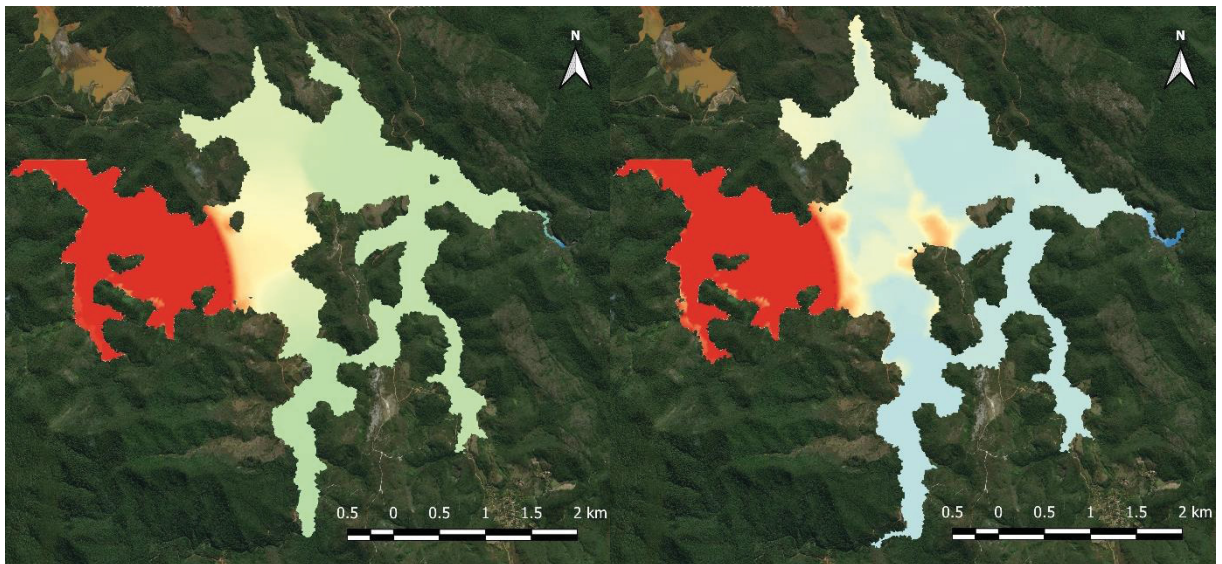
FIGURA 76 – RESULTADOS PARA ELEVAÇÃO DA COTA MÁXIMA (EM METROS) EL. 810m





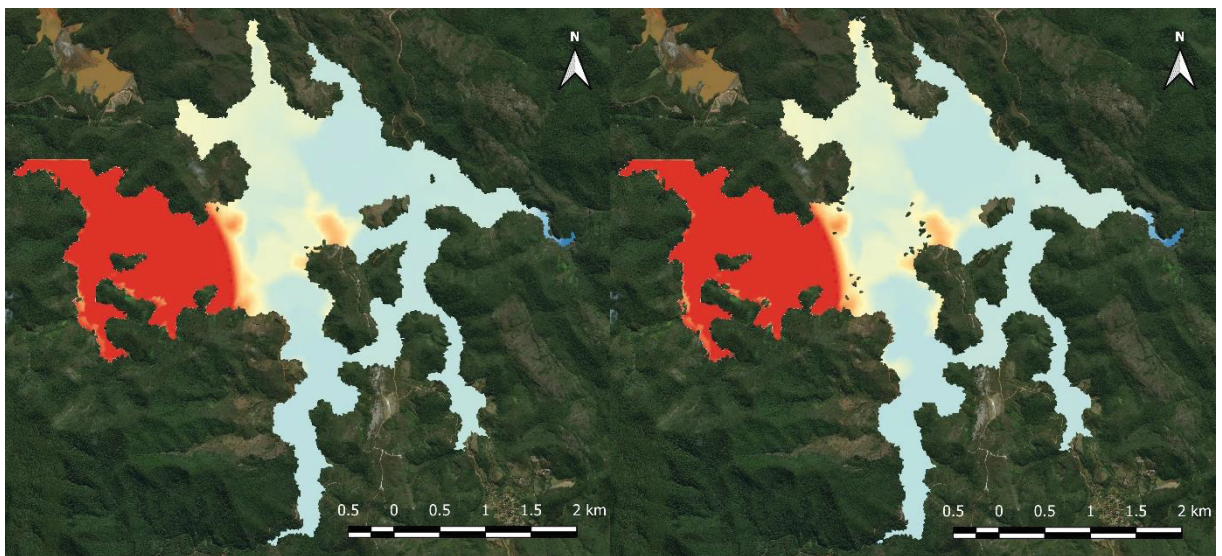
(a) Água

(b) CV35



(c) CV40%

(d) BR35



(e) BR40f

(f) BR40s

FONTE: O autor (2020)

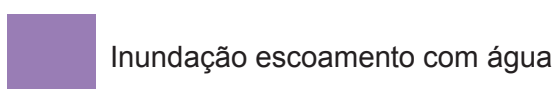
Destaca-se da FIGURA 76 que novamente a água atingiu a maior distância da barragem, apesar da similaridade com a situação BR35 e BR40f. Entretanto, analisando a mancha na parte superior, nota-se que os materiais com certa viscosidade atingiram distâncias maiores. Isso pode ser ocasionado em virtude do escoamento menos viscoso se propagar mais facilmente para jusante, nesse caso, a propagação é no sentido oeste e sul.

Nota-se que as análises com as amostras de Brumadinho/MG atingiram valores inferiores de elevação comparado a água e o material mais argiloso. Isso provavelmente se deve a maior massa específica do material dessas análises (3715 kg/m^3 contra 1000 kg/m^3 e 2970 kg/m^3). Além disso, para o CV40 existe uma região que não é alcançada pelo fluxo. Ou seja, mostra que quanto mais seco o material, menor sua capacidade de escoamento.

Comparando os resultados obtidos das simulações com fluido não-newtoniano com água (FIGURA 77) é possível perceber que as diferenças começam a ficar mais acentuadas quando analisado os cenários de EL.760m e EL.790m. A FIGURA 77 ilustra somente as situações na qual o material possui alguma diferença com relação à água. Nota-se que fluido com as maiores discordâncias foi o BR40s, enquanto o CV35 apresenta as menores. Essas discrepâncias fazem com que algumas regiões sejam atingidas e sejam importantes para a elaboração do PAE, principalmente para definir os locais que devem ser alertados em uma eventual ruptura.

Entretanto, se for analisado em uma escala macro, os resultados não apresentam diferenças alarmantes. Porém, deve-se observar que existem diferenças entre os eles e que estas devem ser estudadas devido às peculiaridades das propriedades reológicas que cada rejeito no reservatório das barragens pode ter. Além disso, existe a influência do modelo de propagação utilizado, conforme ilustrado pela FIGURA 77 ao comparar BR40f e BR40s.

FIGURA 77 – COMPARAÇÃO INUNDAÇÃO EL. 810m





(a) Água-CV35



(b) Água-BR35



(c) Água-BR40f

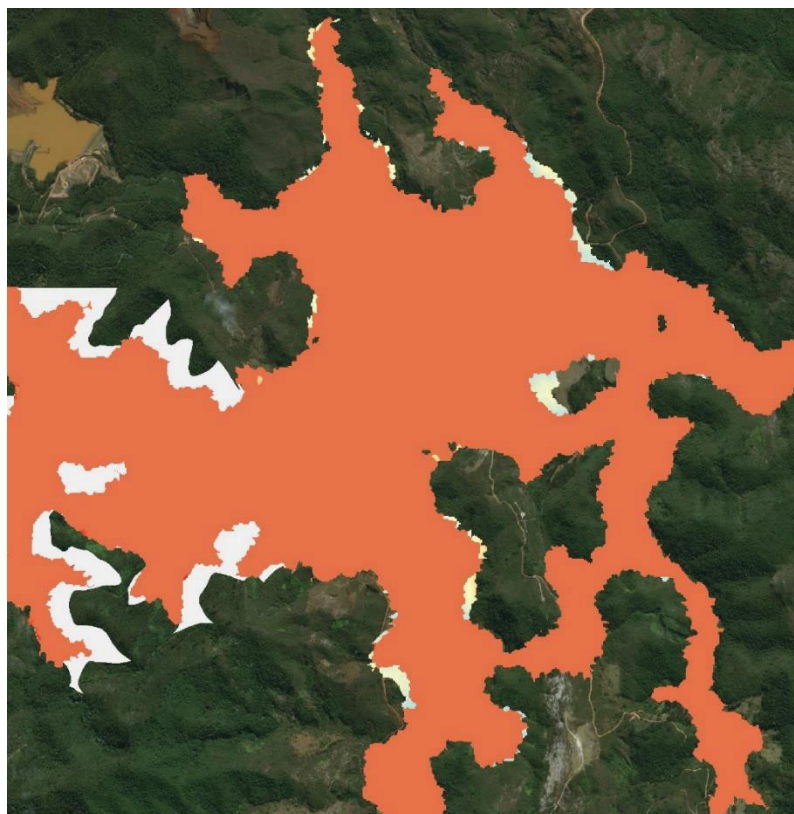


(d) Água-BR40s

FONTE: O autor (2020)

Quando comparado o BR35 e BR40s através da FIGURA 78, nota-se que as desigualdades existem, entretanto não possuem as mesmas proporções quando comparado com a situação cujo fluido é a água.

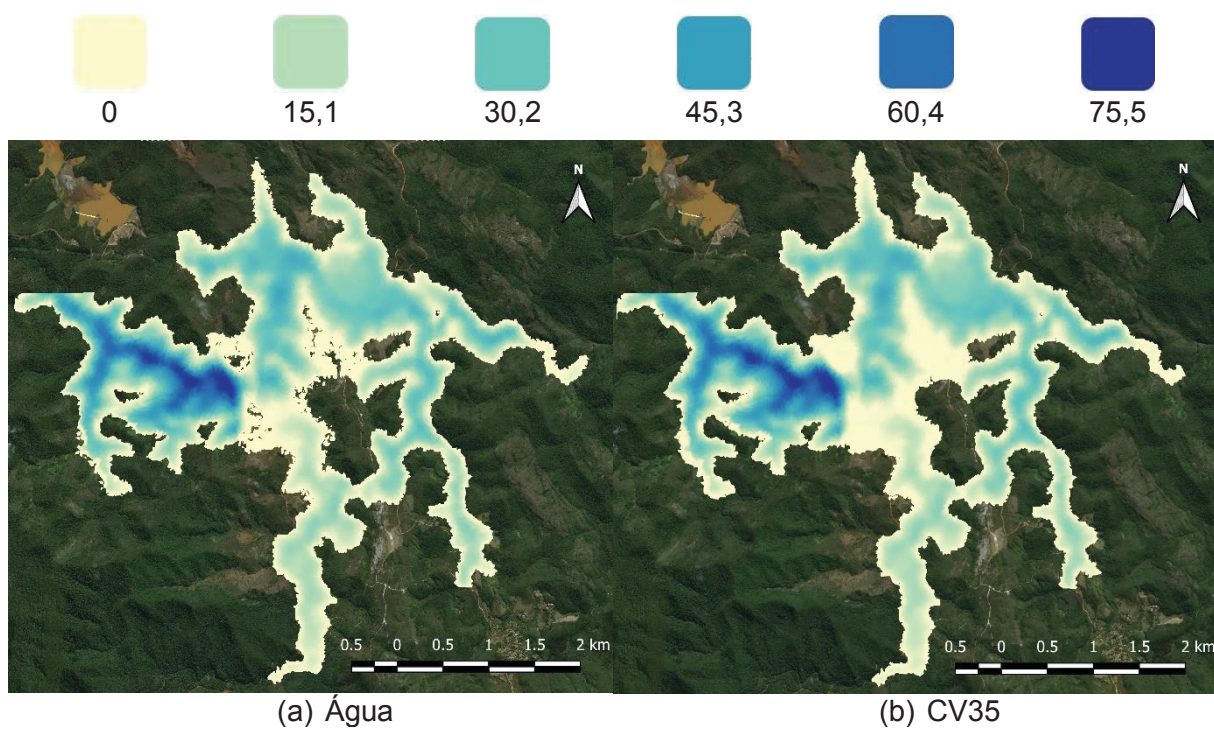
FIGURA 78 – COMPARAÇÃO DO CENÁRIO BR35 E BR40s PARA EL. 810m

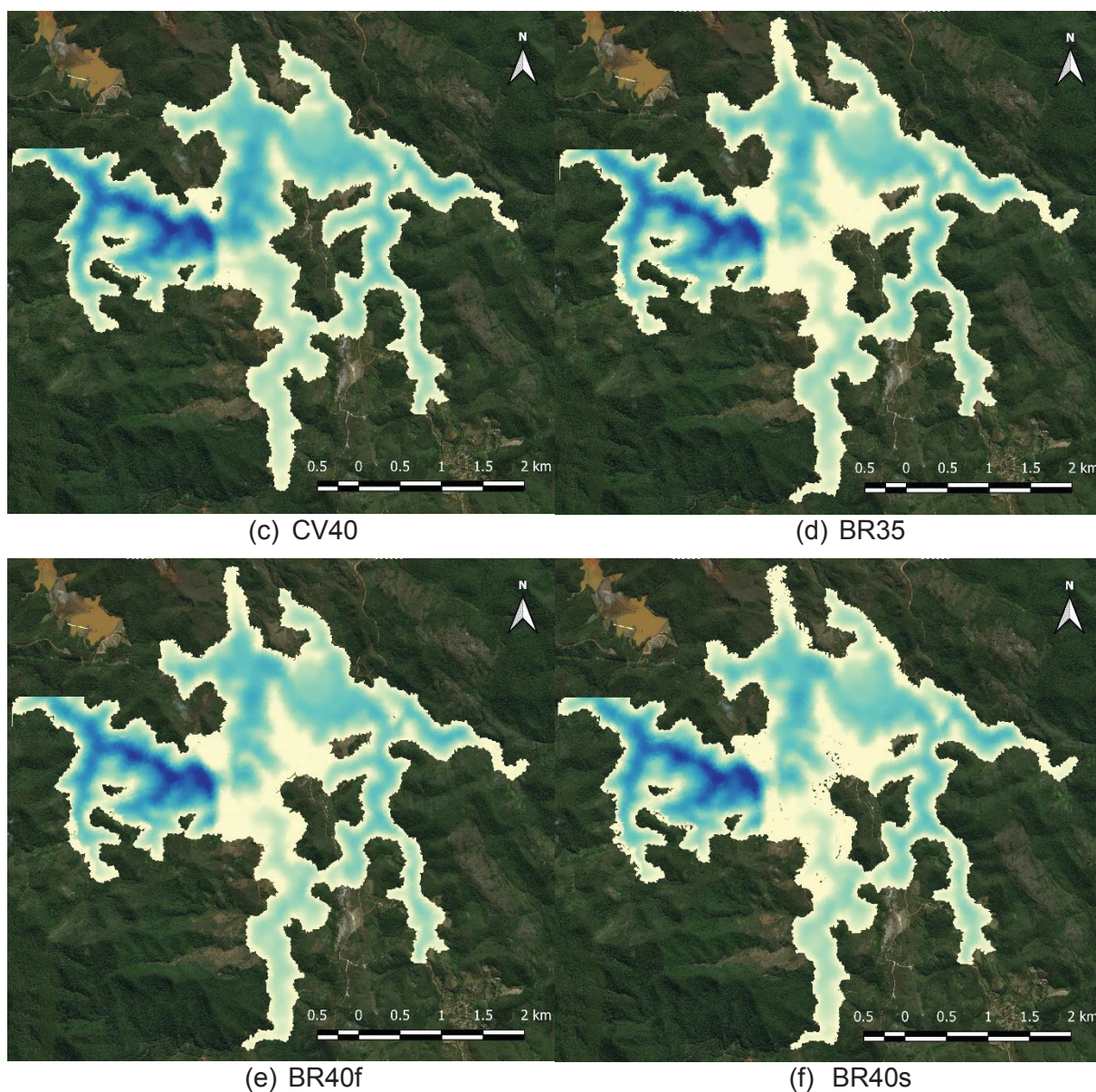


FONTE: O autor (2020)

A seguir é apresentado na FIGURA 79 os resultados para a profundidade.

FIGURA 79 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA PROFUNDIDADE (EM METROS) PARA EL. 810m

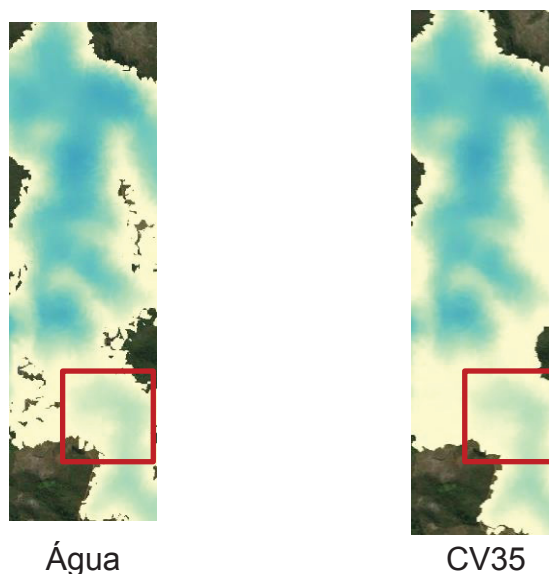




FONTE: O autor (2020)

Pela FIGURA 79, é possível verificar que para o CV40 a diferença de profundidade no início do escoamento fica mais acentuada comparado às outras situações, sendo fácil notar uma região mais azulada, o que representa profundidades maiores. Nota-se que a água apresenta nesse início um azul levemente mais claro indicando menores profundidades, exemplificado na FIGURA 80. Outro ponto é que novamente pouca diferença dos materiais BR40f e BR40s, sendo os resultados praticamente os mesmos.

FIGURA 80 – DETALHE COMPARATIVO DA PROFUNDIDADE PARA EL. 790m

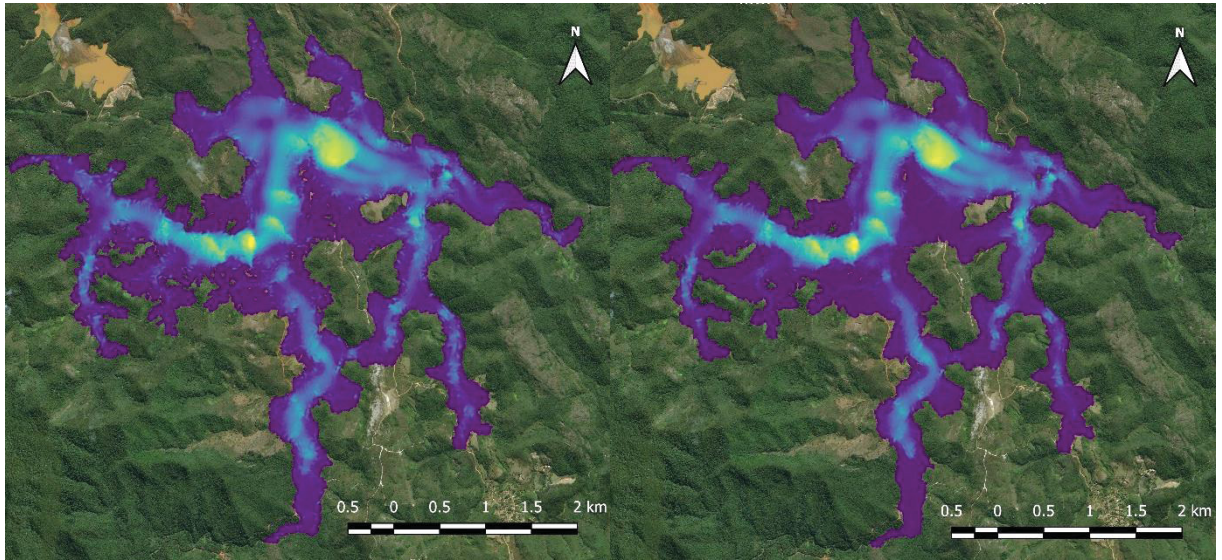


FONTE: O autor (2020)

Já as velocidades apresentaram os resultados ilustrados na FIGURA 81. Nota-se que existe velocidades maiores para BR40s quando comparado ao BR40f, principalmente se verificado o escoamento no sentido sul. Percebe-se uma coloração mais clara nesse sentido, indicando uma maior velocidade. Outra questão que pode ser destacada no escoamento que se propaga para oeste é a existência de uma região em que as amostras com solo siltoso (BR35, BR40f e BR40s) apresentam maiores velocidades. Esse detalhe pode ser melhor verificado na FIGURA 82. Nesta figura também se nota que os materiais menos viscosos (solo siltoso) alcançam distância de propagação semelhante à da água

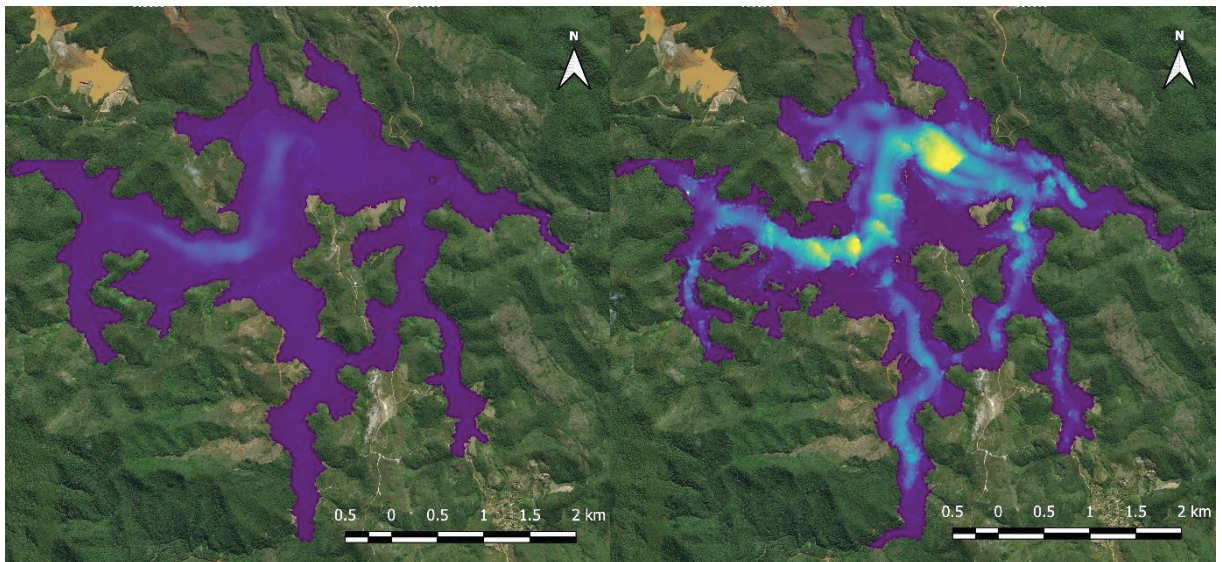
FIGURA 81 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA VELOCIDADE MÁXIMA (m/s) PARA EL. 810m





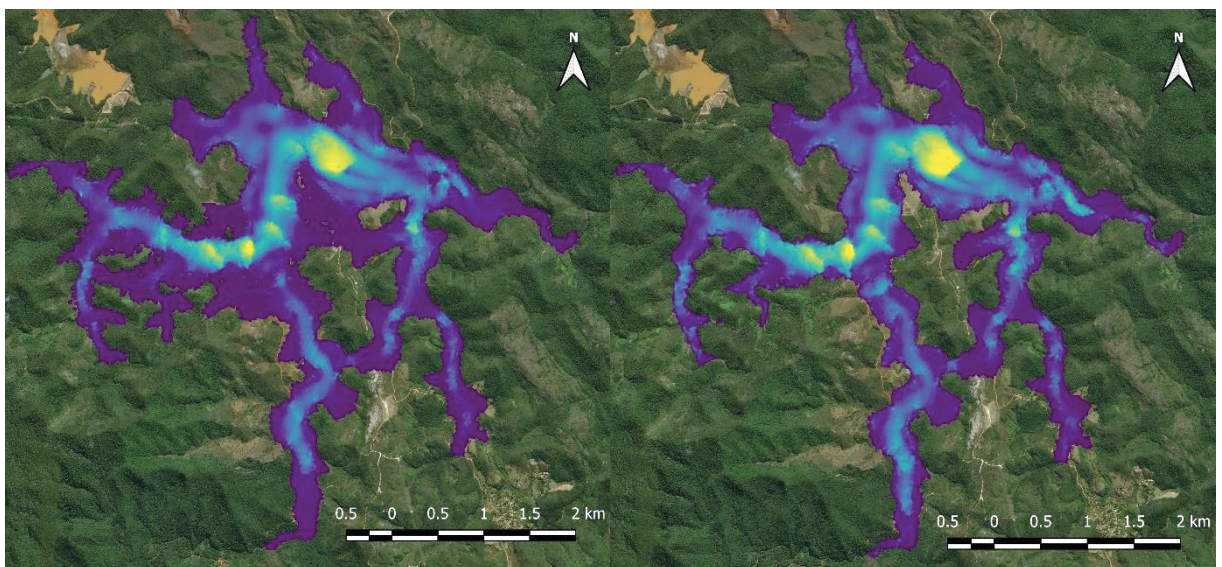
(a) Água

(b) CV35



(c) CV40

(d) BR35

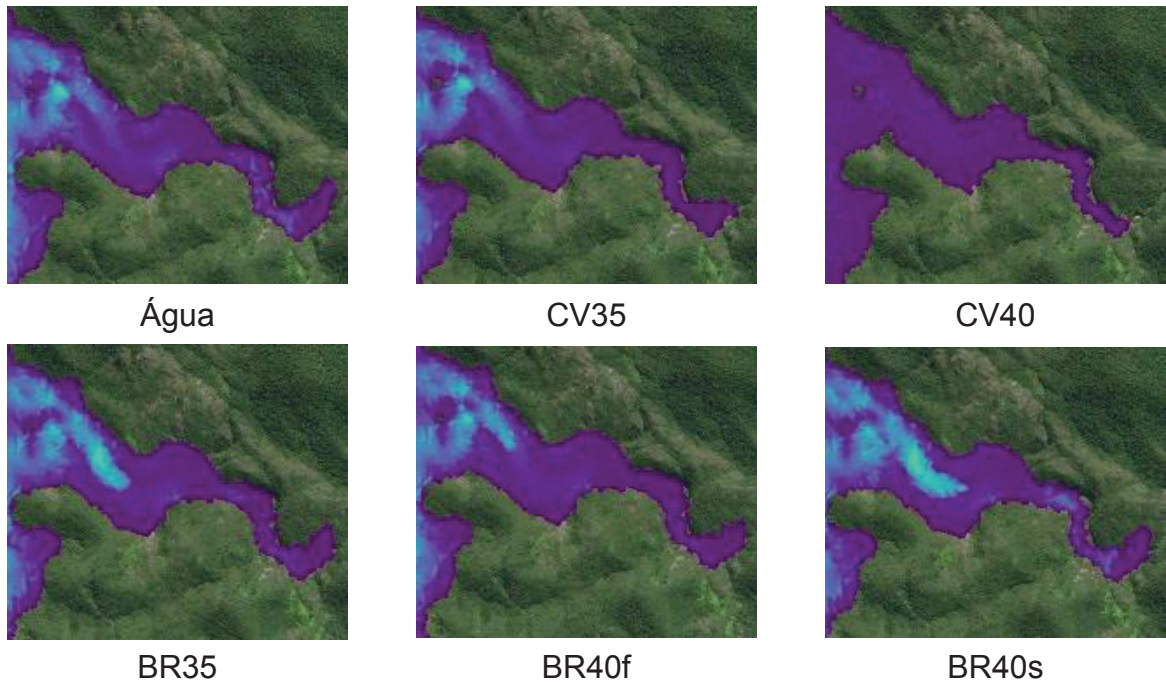


(e) BR40f

(f) BR40s

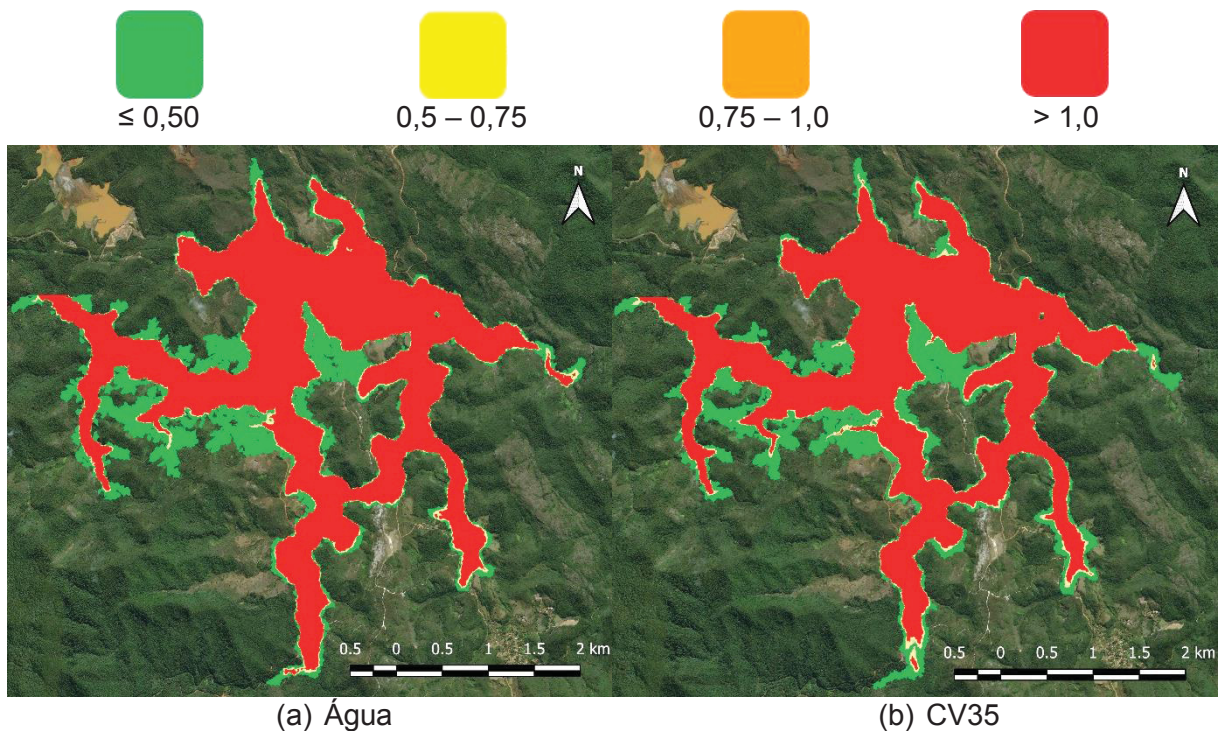
FONTE: O autor (2020)

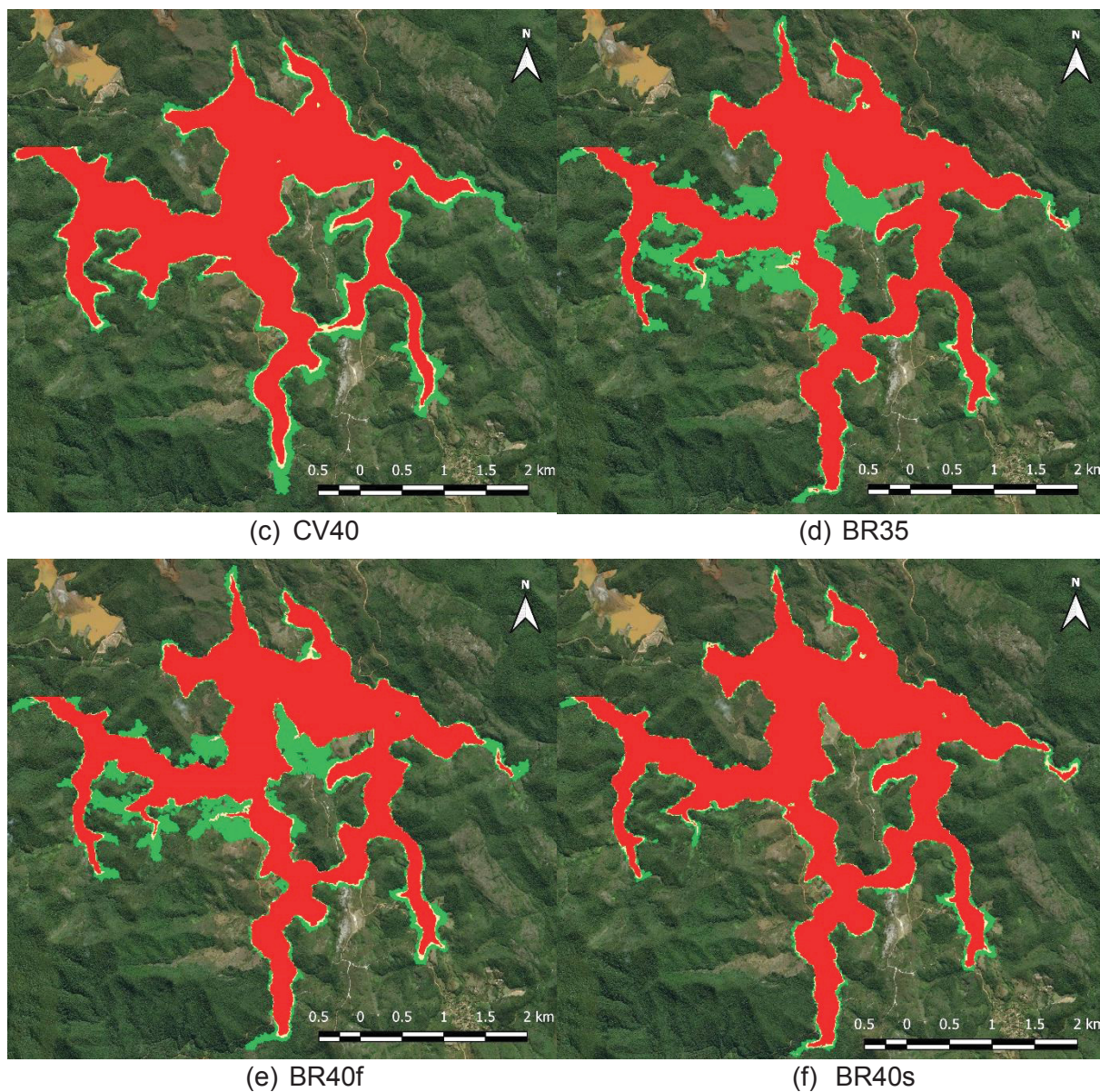
FIGURA 82 – DETALHE COMPARATIVO VELOCIDADES PARA EL. 810m



FONTE: O autor (2020)

A seguir é apresentado o resultado da multiplicação da altura e velocidade, sob os aspectos da TABELA 1 para o risco hidrodinâmico. A FIGURA 83 apresenta os resultados obtidos para EL. 810m.

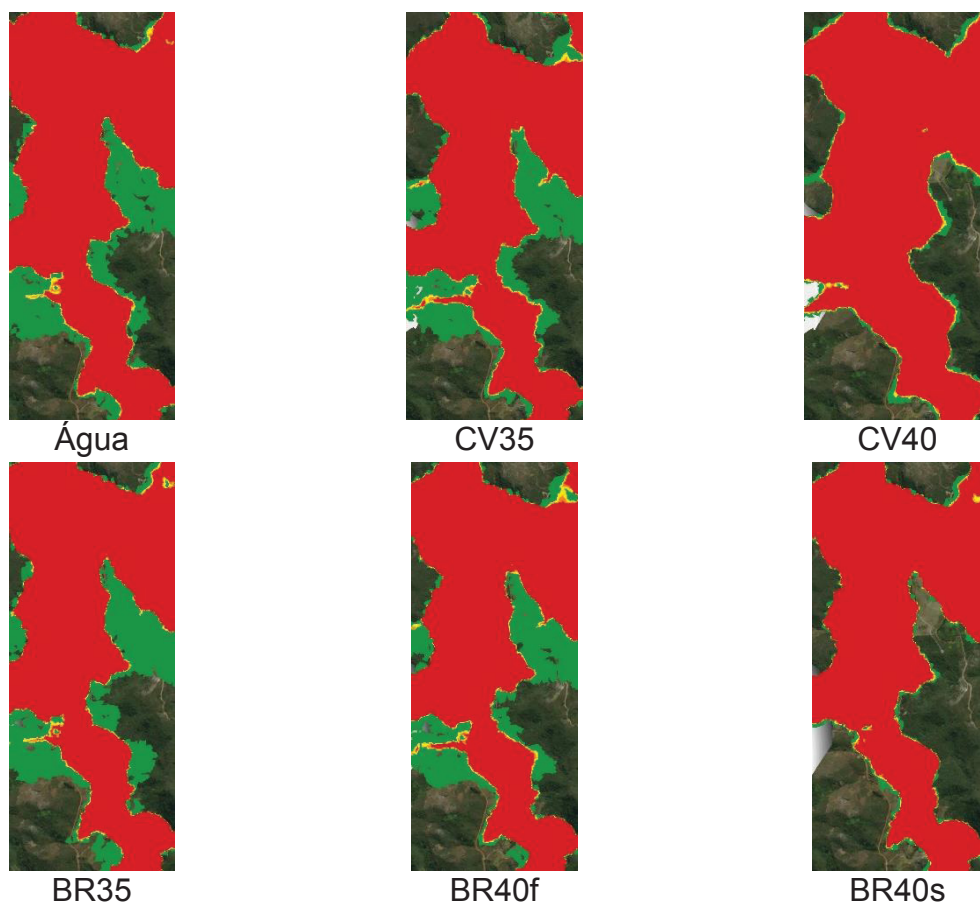
FIGURA 83 – RESULTADOS NUMÉRICOS DO RISCO HIDRODINÂMICO (m^2/s) PARA EL. 810m



FONTE: O autor (2020)

Nessa análise percebe-se que nas extremidades, a água sempre se mostra com os maiores riscos com exceção o caso BR40s, que apresenta o risco semelhante; as outras situações sempre mostram um resultado inferior. Também é possível identificar que o CV40, apesar de apresentar uma mancha menor que os outros, existe uma região em que o risco se mostra maior, destacado na FIGURA 84.

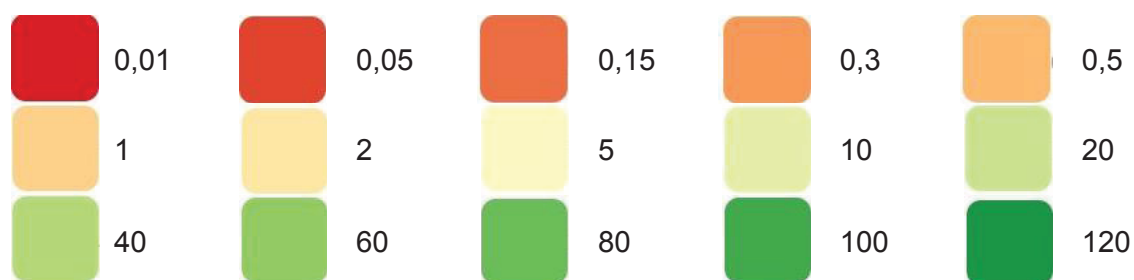
FIGURA 84 – DETALHE COMPARATIVO PARA O RISCO HIDRODINÂMICO NA EL. 810m

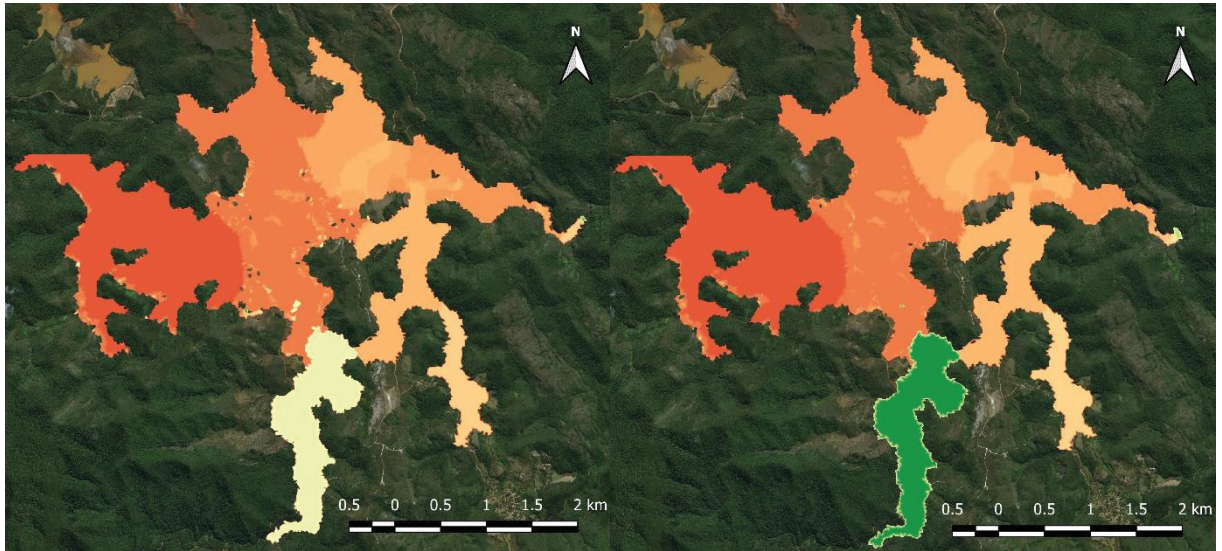


FONTE: O autor (2020)

Se for descartada a região cuja risco hidrodinâmico é menor que $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ (verde) e focar-se somente no nível alto (vermelho), o início do escoamento para CV40 apresenta um resultado com abrangência maior que os demais, mostrando-se assim mais perigoso para as vidas humanas. Apesar de possuir as menores velocidades, como o risco depende da altura do escoamento, essa situação é observada. Em seguida é descrito o resultado para o tempo para chegada no nível máximo de inundação, conforme FIGURA 85.

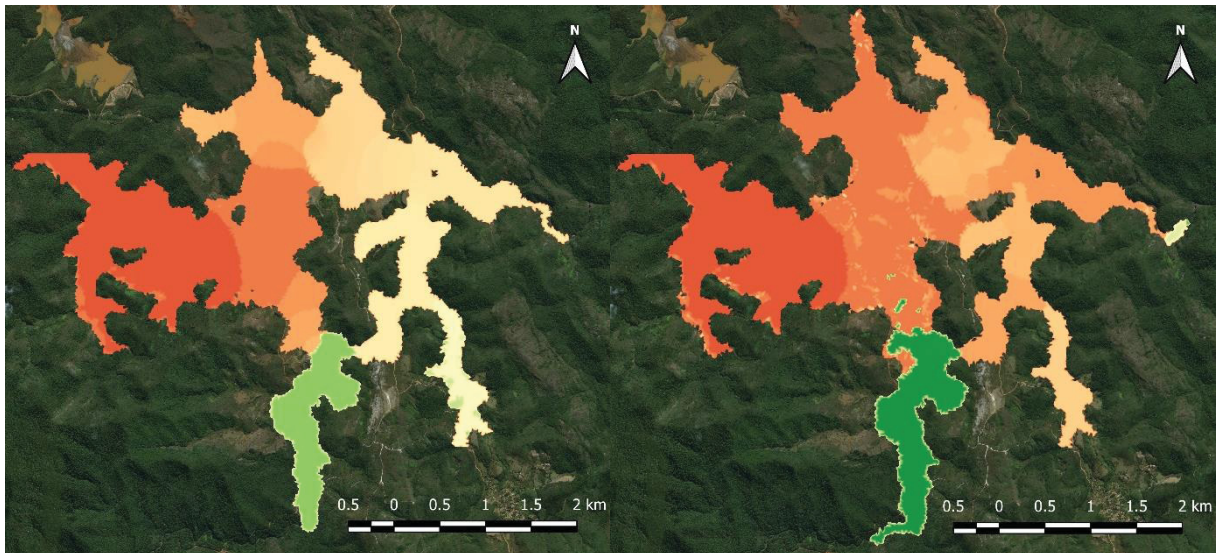
FIGURA 85 – RESULTADOS PARA TEMPO PARA NÍVEL MÁXIMO (EM HORAS) PARA EL. 810m





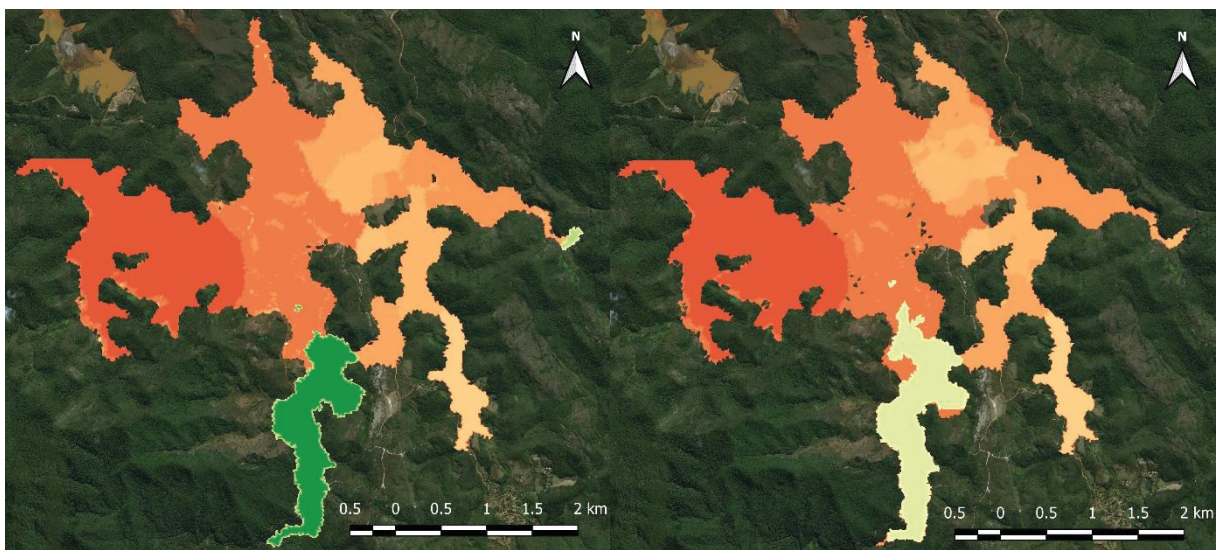
(a) Água

(b) CV35



(c) CV40

(d) BR35



(e) BR40f

(f) BR40s

FONTE: O autor (2020)

Pela figura é possível notar que com exceção do CV40, todos os outros cenários possuem tempos parecidos, salvo uma região ou outra. O CV40, como nas amostras anteriores, possui um tempo maior para se propagar até as extremidades, neste caso de 10 vezes (2h para 20h), conforme FIGURA 86.

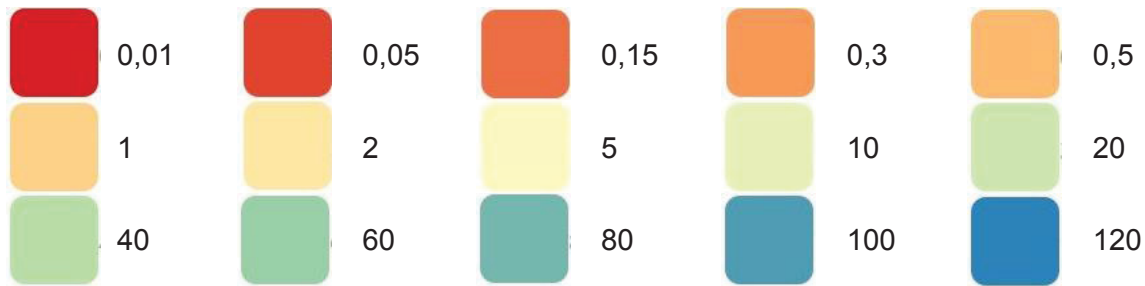
FIGURA 86 – DETALHE DO TEMPO COTA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO NA EL. 810m

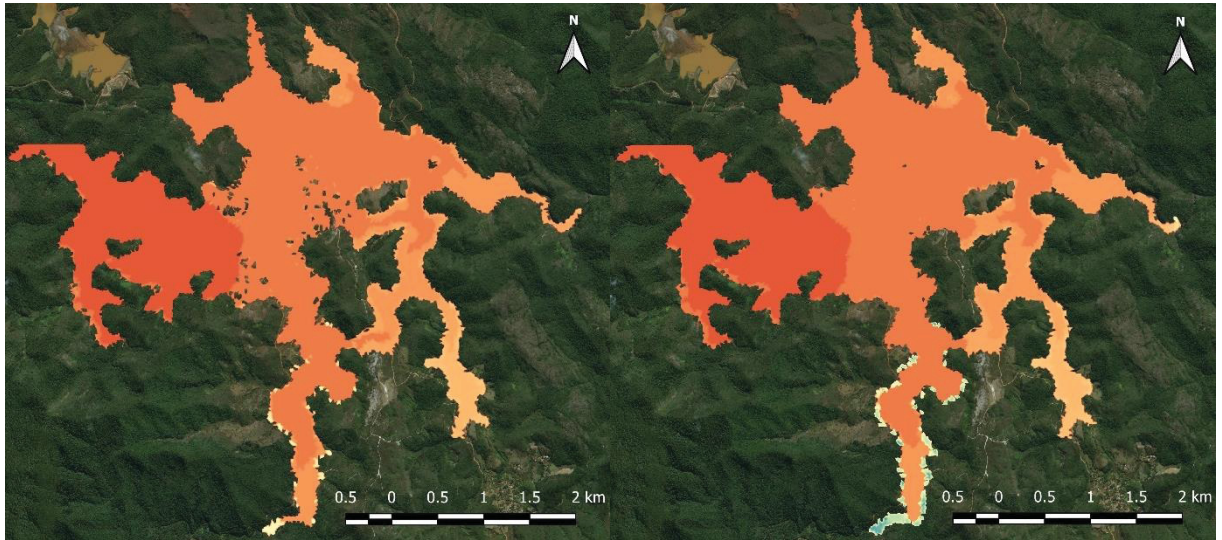


FONTE: O autor (2020)

Existem em todas as simulações locais onde a propagação possui tempo muito superior aos demais do cenário visto. Isso pode representar um deslocamento residual para os escoamentos mais viscosos, resultando em mais tempo para o salvamento das populações. Porém, como já informado, também é interessante apresentar o tempo para a chegada dessa onda, representado na FIGURA 87.

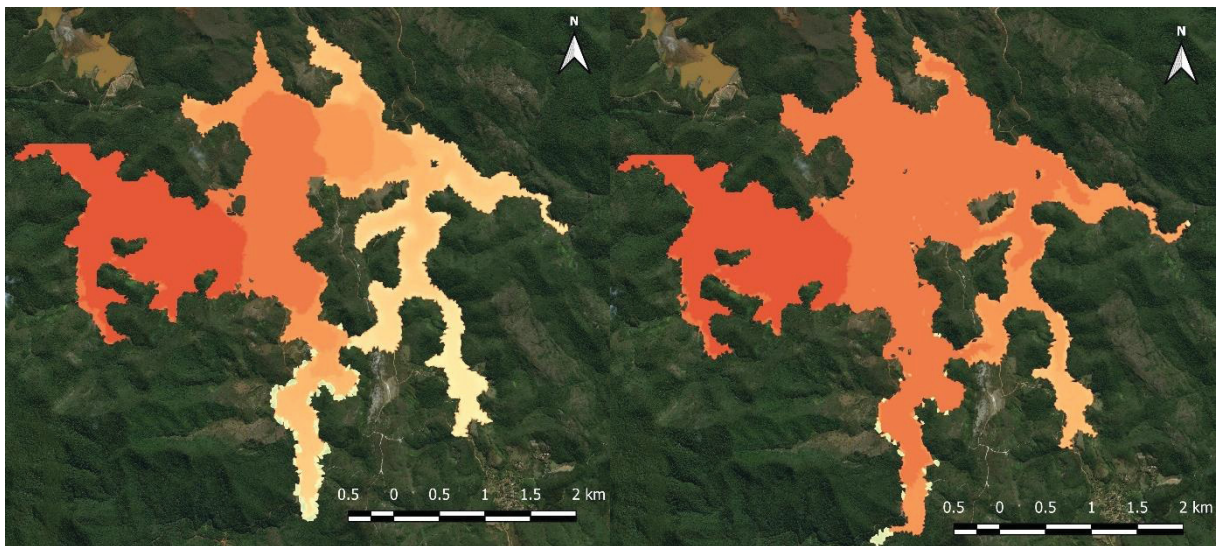
FIGURA 87 – RESULTADOS PARA O TEMPO CHEGADA DA ONDA (HORAS) PARA EL. 810m





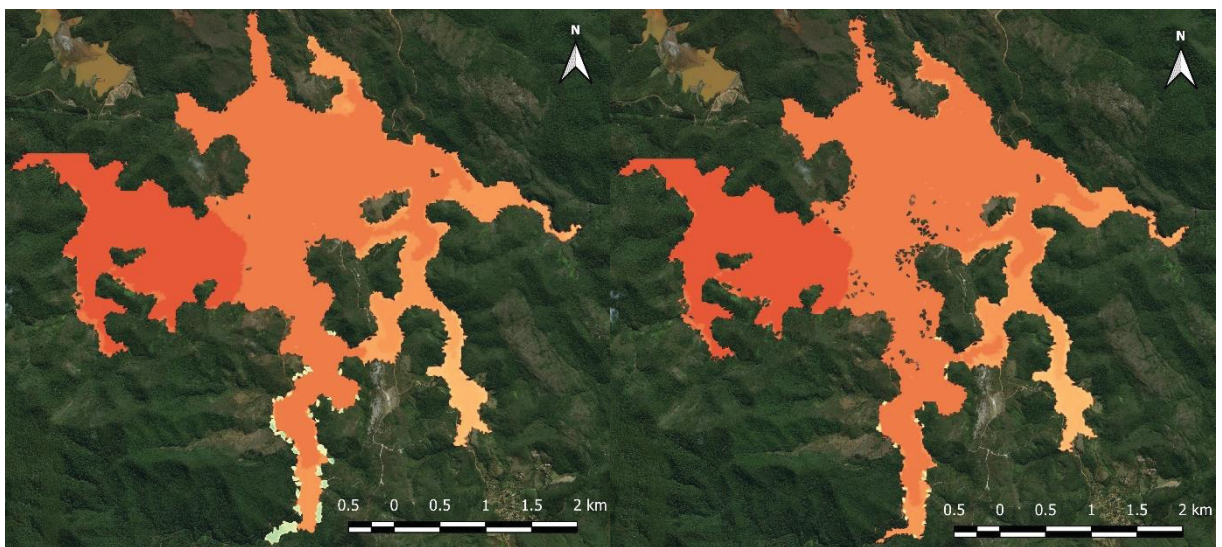
(a) Água

(b) CV35



(c) CV40

(d) BR35



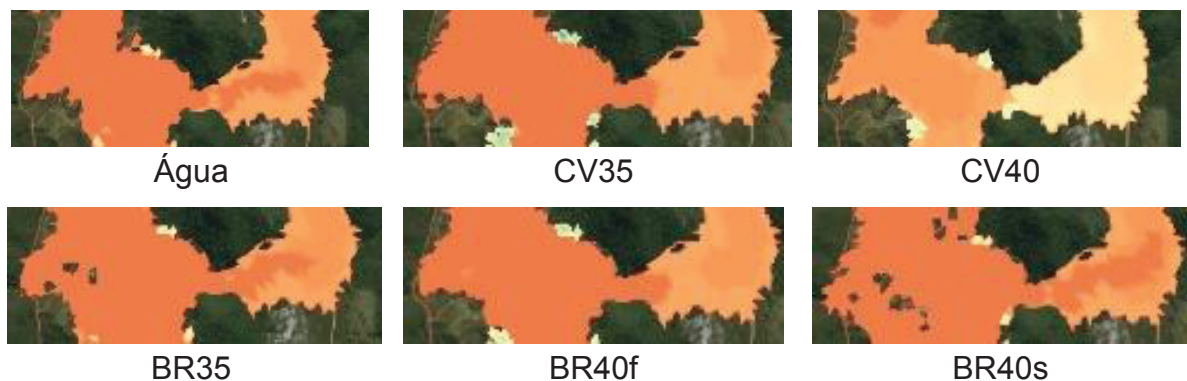
(e) BR40f

(f) BR40s

FONTE: O autor (2020)

Para o tempo de chegada de onda alguns detalhes devem ser apontados, o primeiro é que existem regiões onde o material mais pesado (solo predominantemente siltoso) possui um menor tempo de chegada comparado aos outros (FIGURA 88).

FIGURA 88 – DETALHE COMPARATIVO PARA TEMPO DE CHEGADA DA ONDA NA EL. 810m



FONTE: O autor (2020)

Nota-se que a diferença chega a ser de 21 minutos (0,35 horas), ou seja, existe alguns minutos extras para as pessoas se retirarem da localização. Para o modelo BR40f e BR40s a diferença mais significativa é na extremidade sul, no qual o primeiro apresenta um tempo de 10 horas, enquanto o segundo um tempo de 0,5 horas, conforme FIGURA 89. Outra diferença é que o material com escoamento Bingham completo possui uma mancha mais larga que o modelo simplificado.

FIGURA 89 – DETALHE COMPARATIVO DO BR40f E BR40s PARA TEMPO DE CHEGADA DA ONDA NA EL. 810m

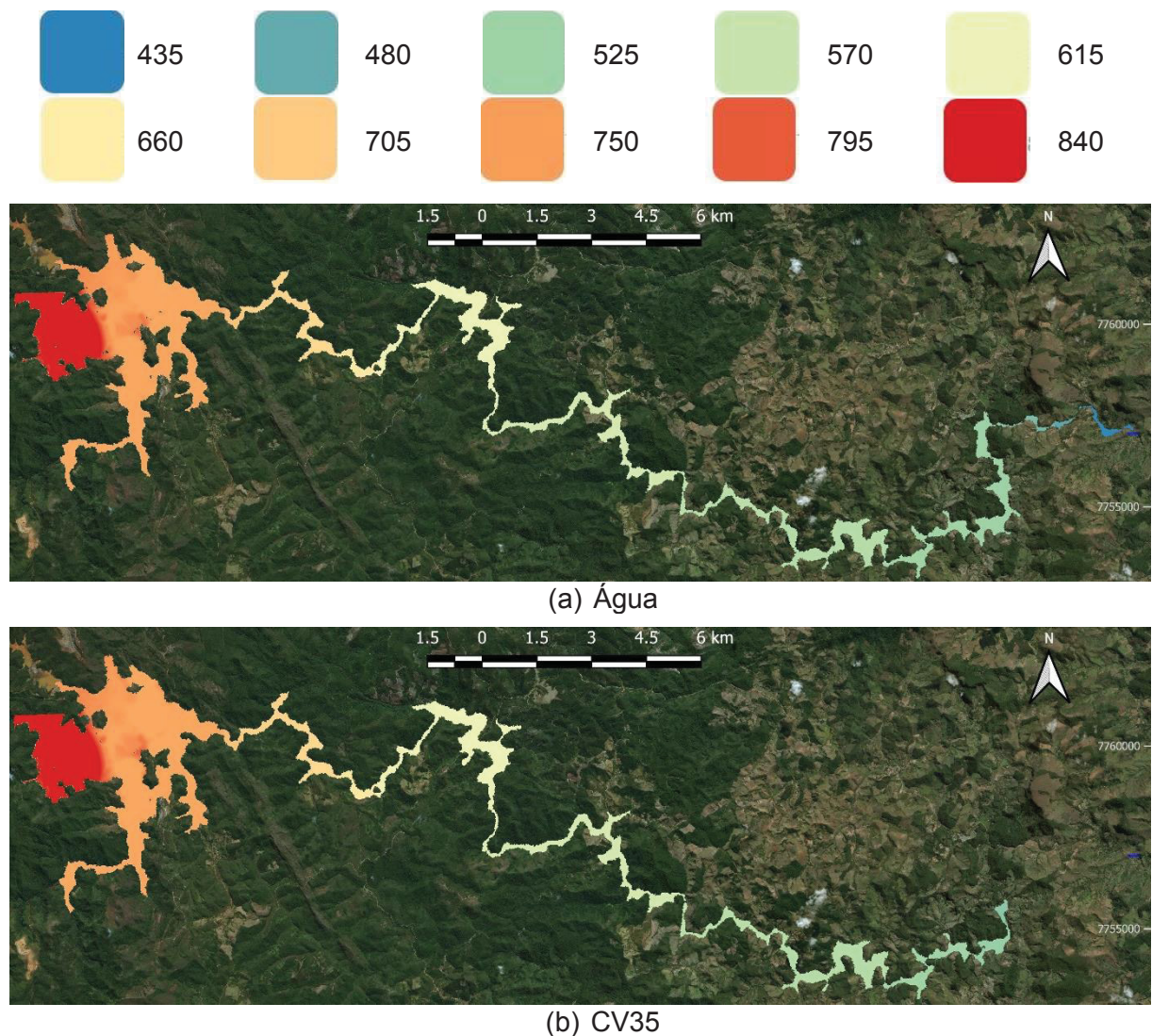


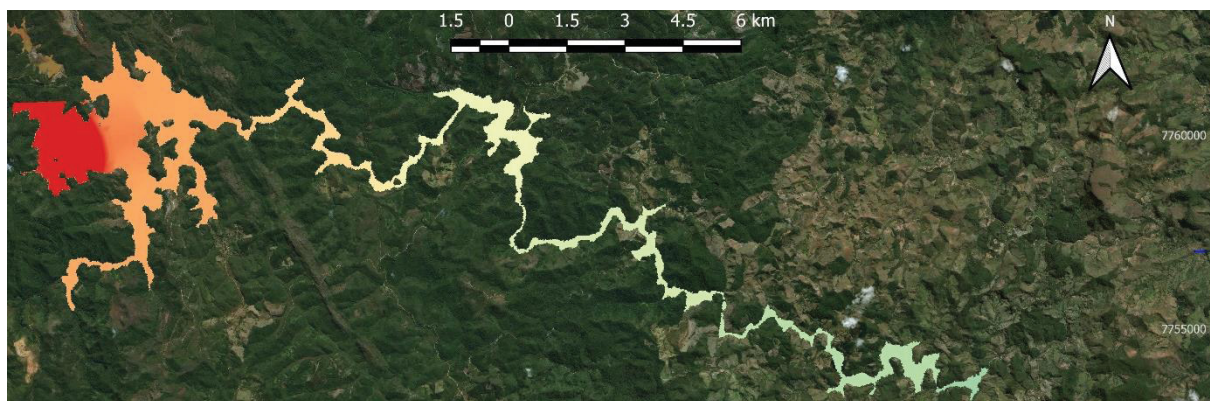
FONTE: O autor (2020)

4.4 BARRAMENTO COM EL. 840M

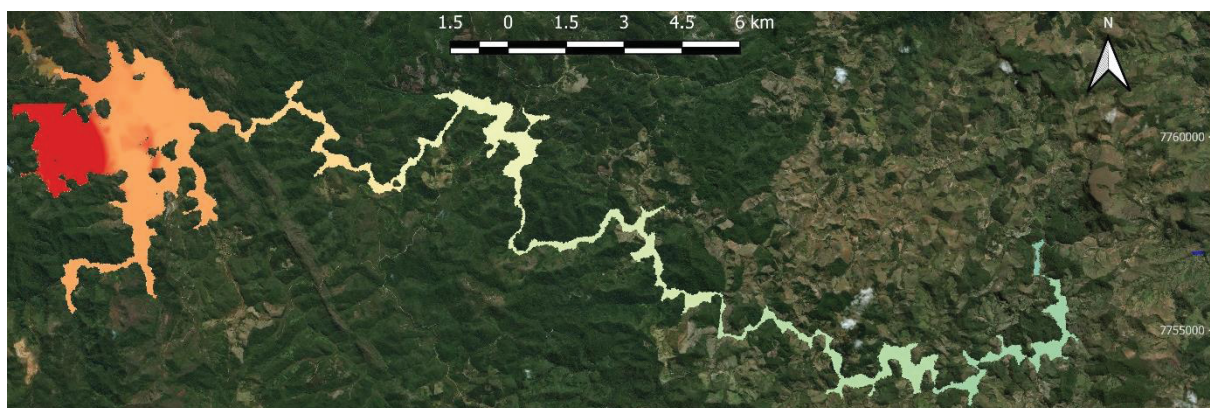
A última situação analisada é para a EL.840m, na qual as análises mostram diferenças mais significativas, principalmente para o escoamento a jusante no sentido oeste. Isso já pode ser observado no resultado para a cota máxima de inundação (FIGURA 90). Nota-se que o material mais fluido apresenta uma distância de propagação maior, entretanto, as menores elevações são observadas para este material (menos viscoso). Já com os mais viscosos ocorre o oposto, a distância de propagação é menor, porém com elevações maiores.

FIGURA 90 – RESULTADOS PARA ELEVÇÃO DA COTA MÁXIMA (EM METROS) EL. 840m

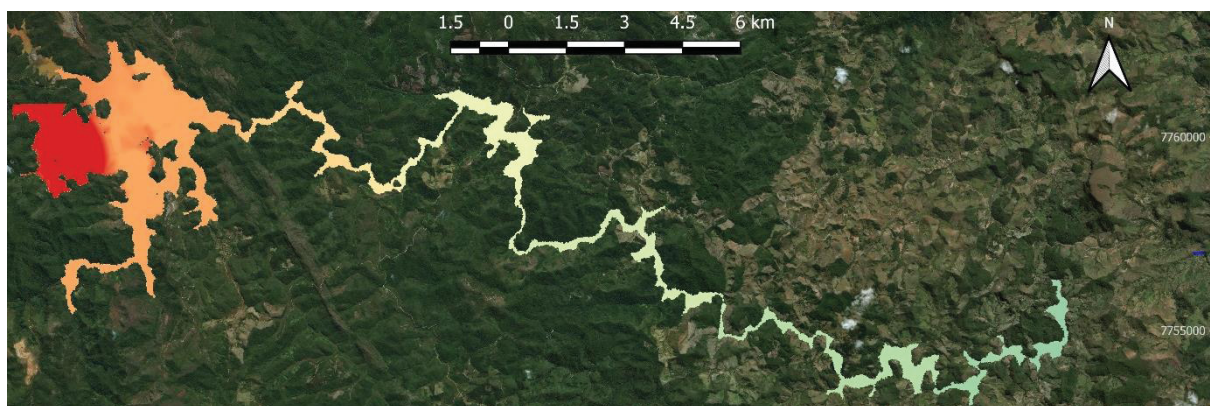




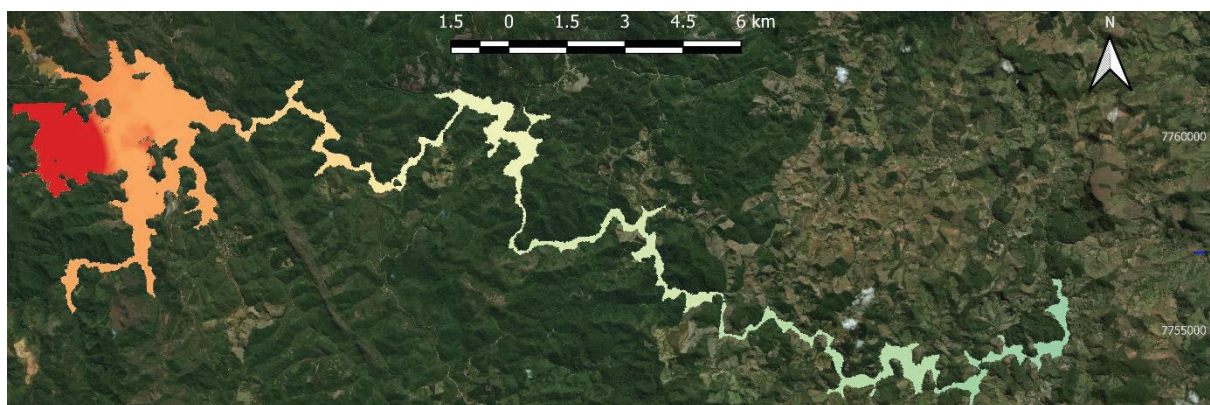
(c) CV40



(d) BR35



(e) BR40f



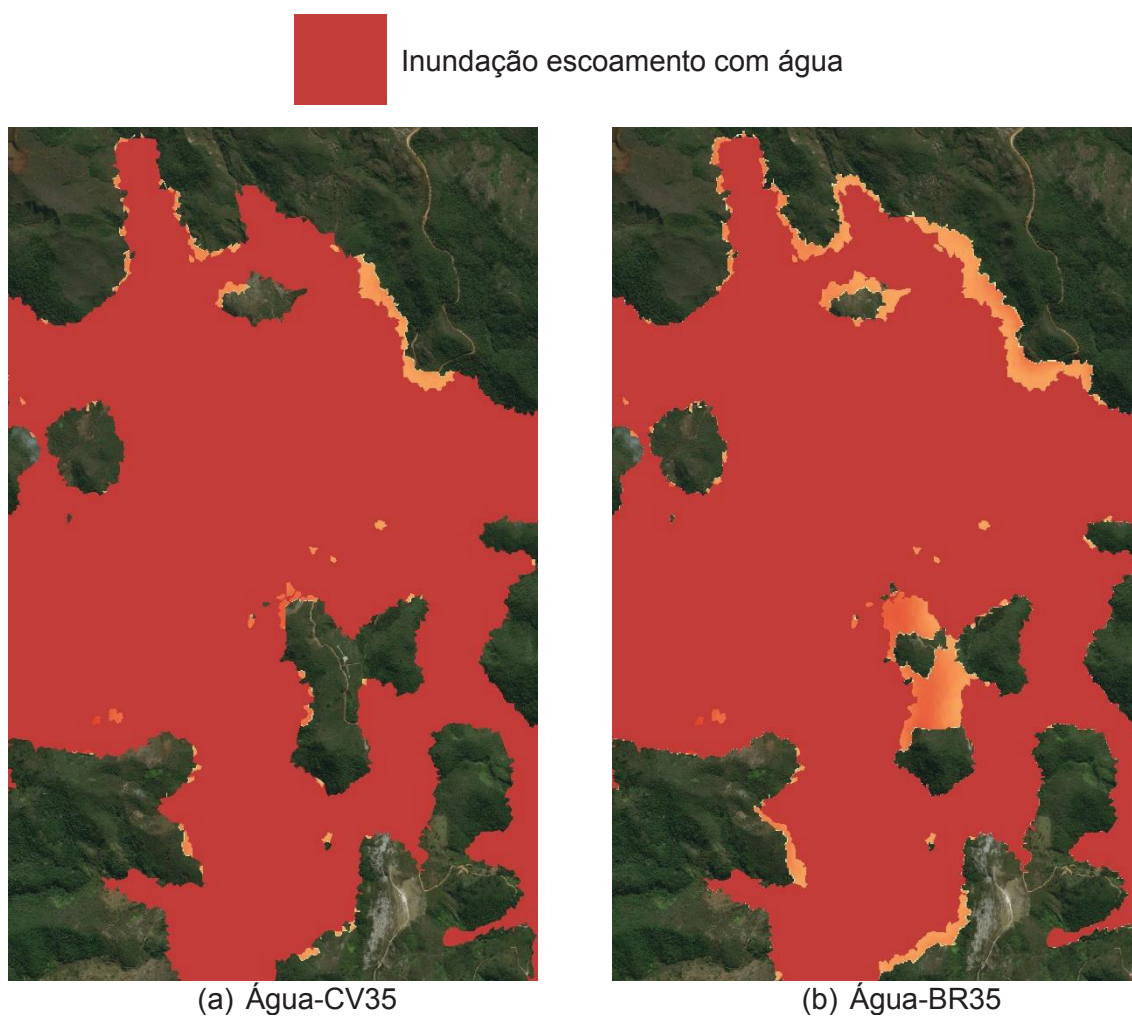
(f) BR40s

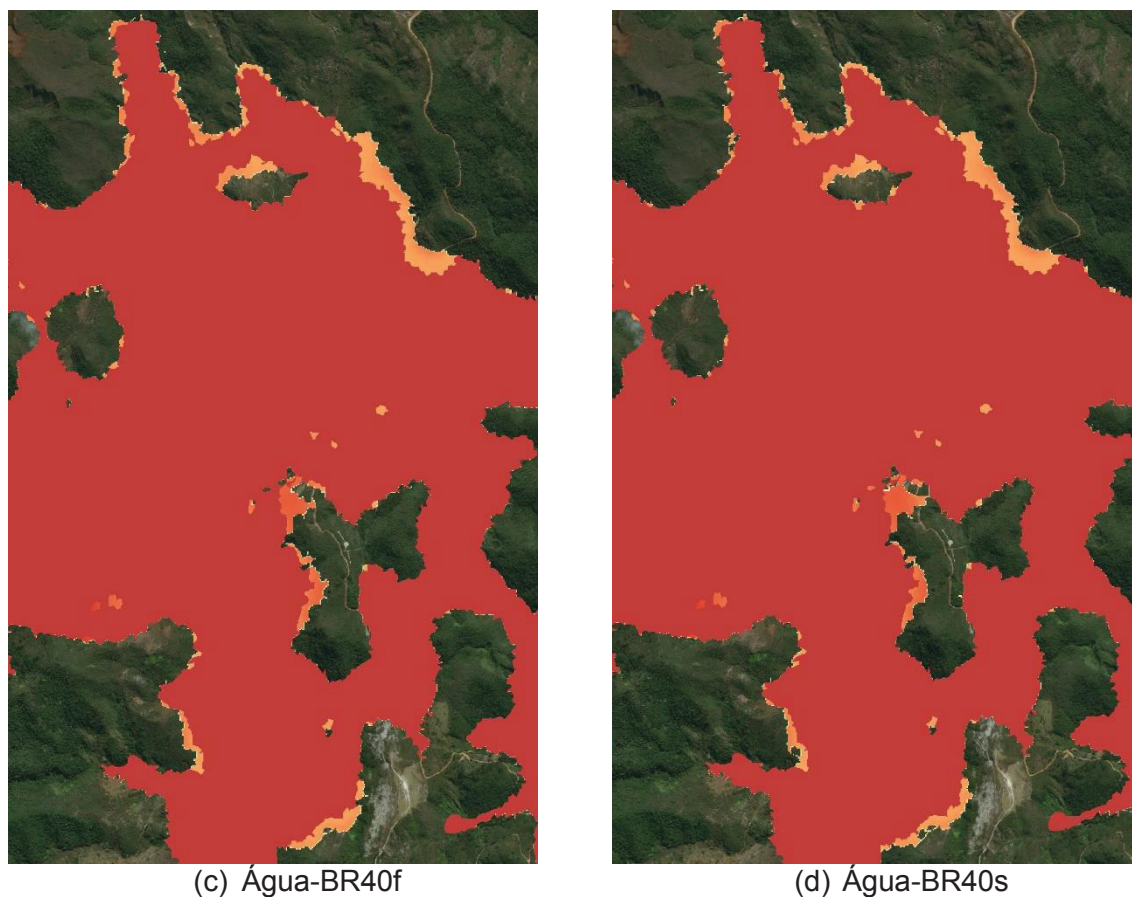
FONTE: O autor (2020)

A situação com água foi a que atingiu maiores distâncias nas simulações comparado as outras situações, isso representou uma distância média de 7,55 km a mais que as outras (7,4 km para CV35, 11,57 km para CV40, 5,4 km para BR35 e 6,7 km para BR40f e BR40s). Além disso, para BR40f e BR40s, os resultados são bem similares, não apresentando diferenças em uma escala macro.

Analisando os detalhes é possível perceber desigualdades no mapa de inundação de cada fluido, conforme pode ser visto na FIGURA 91. O material que apresenta uma área mais larga é o BR35, no qual se pode observar que o escoamento invade uma região no qual os outros não avançam na mesma proporção. Além disso, a inundação ao norte consegue propagar mais que os outros.

FIGURA 91 – COMPARAÇÃO INUNDAÇÃO EL. 840m

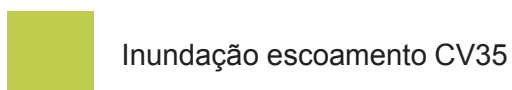


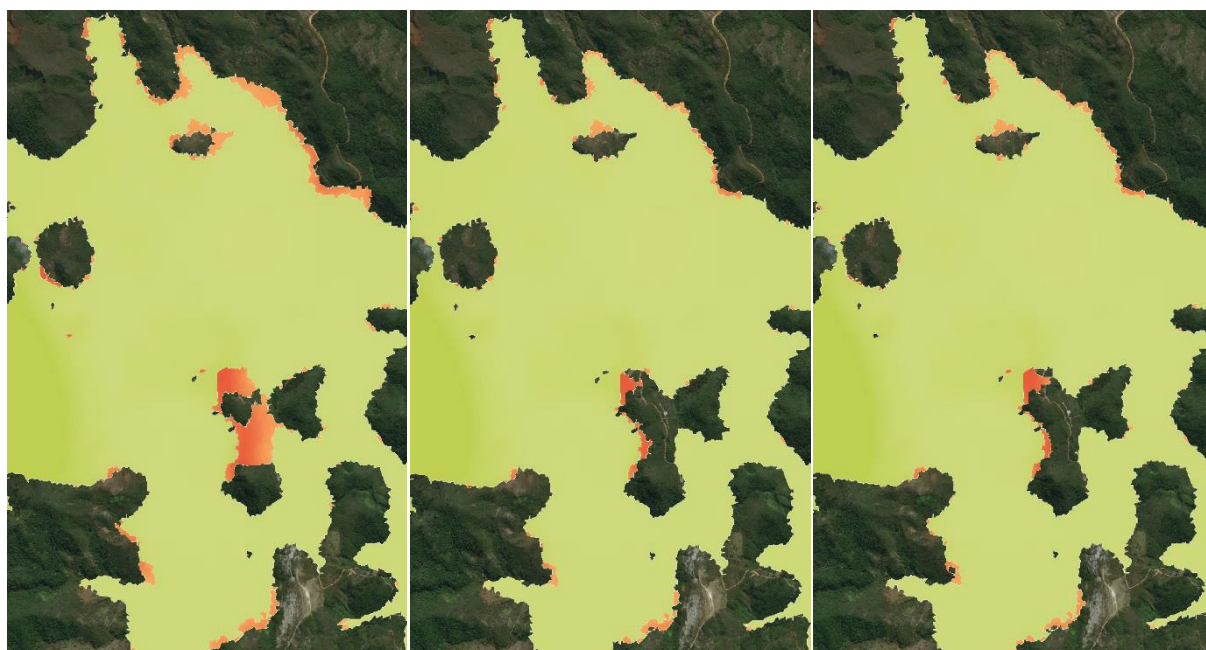


FONTE: O autor (2020)

A FIGURA 92 apresenta a diferença da inundação entre o CV 35 e os demais (BR35, BR40f e BR40s). Pelas imagens nota-se que os escoamentos BR40f e BR40s possuem uma inundação semelhante, com poucas diferenças comparativas com o CV35, já o BR35 apresenta discrepâncias mais notórias que os outros. Entretanto, com exceção da região central destacada anteriormente, as outras diferenças, localizadas ao norte, não se mostram áreas muito grandes. Ressalta-se, no entanto, que essas diferenças existem e, em um outro cenário de ruptura, poderiam ser relevantes.

FIGURA 92 – COMPARAÇÃO DO CENÁRIO CV35 COM BR35, BR40f E BR40s PARA EL. 810m





CV35-BR35

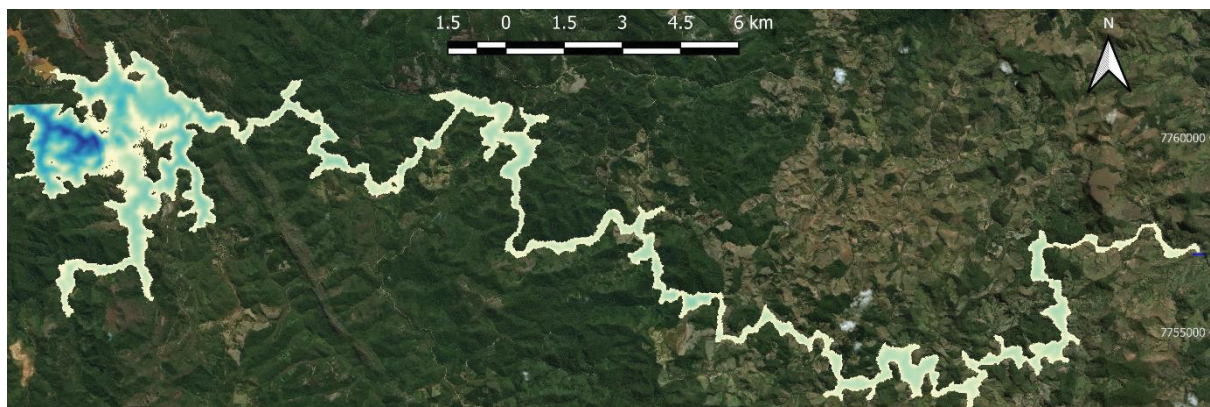
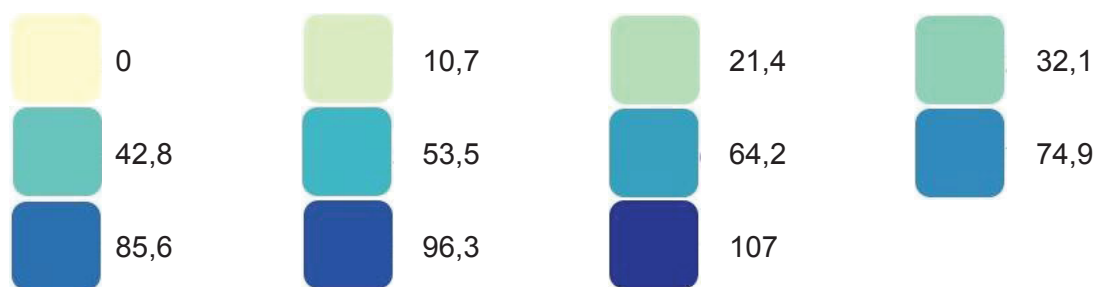
CV-35-BR40f

CV-35-BR40s

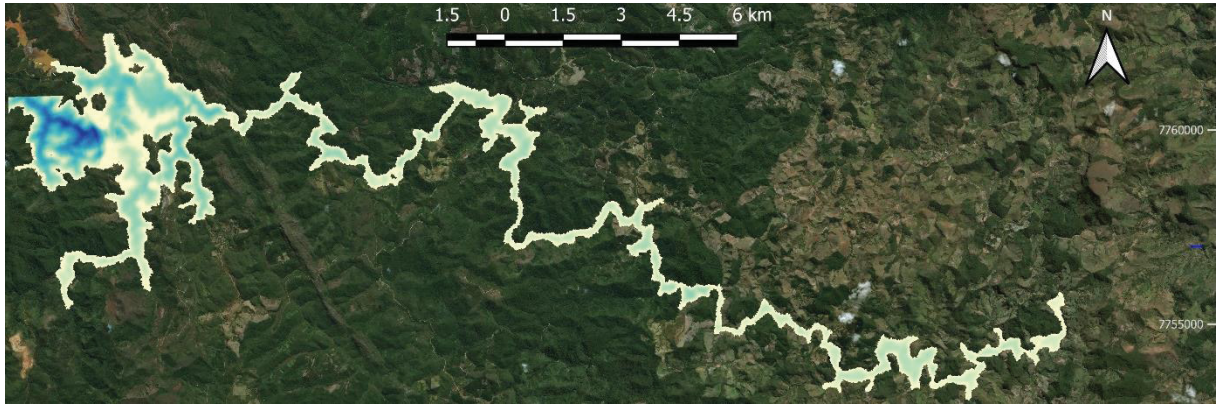
FONTE: O autor (2020)

A seguir são apresentados os valores de profundidade (FIGURA 93).

FIGURA 93 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA PROFUNDIDADE (EM METROS) PARA EL. 840m



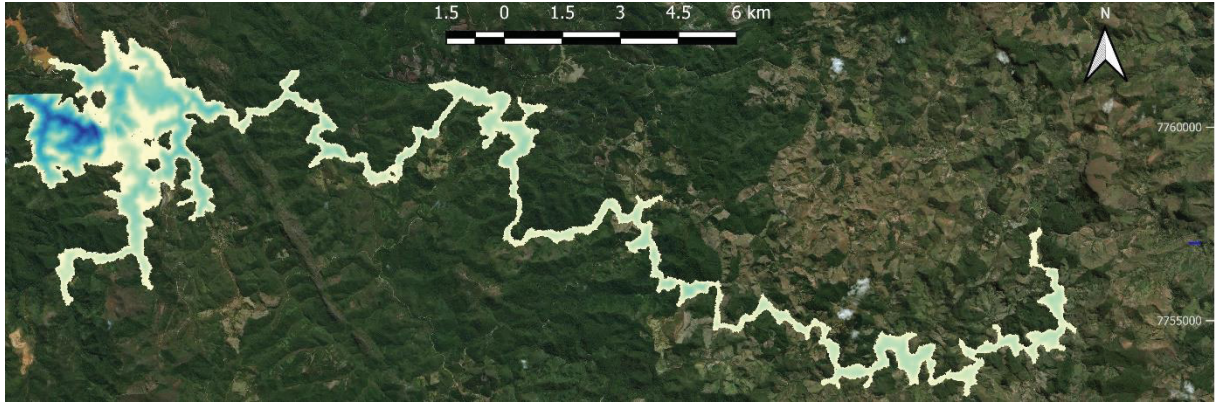
(a) Água



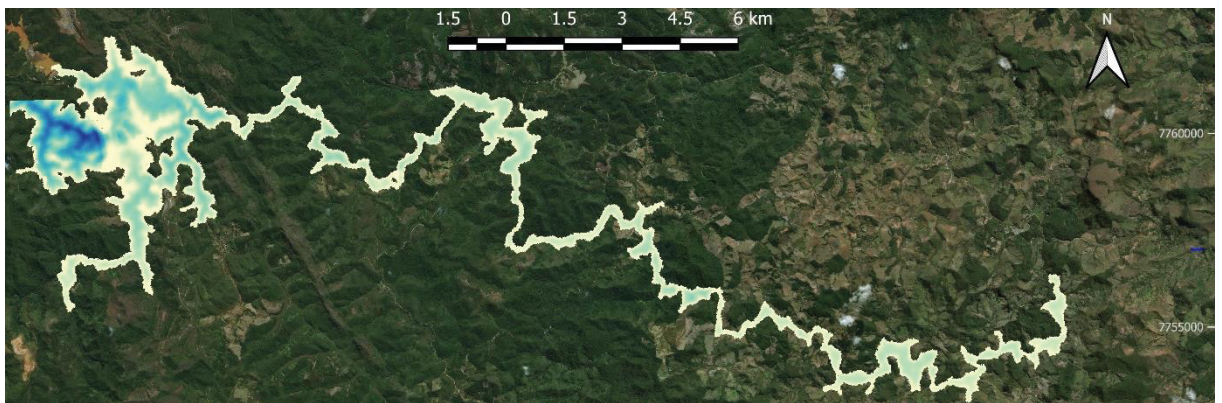
(b) CV35



(c) CV40



(d) BR35



(e) BR40f

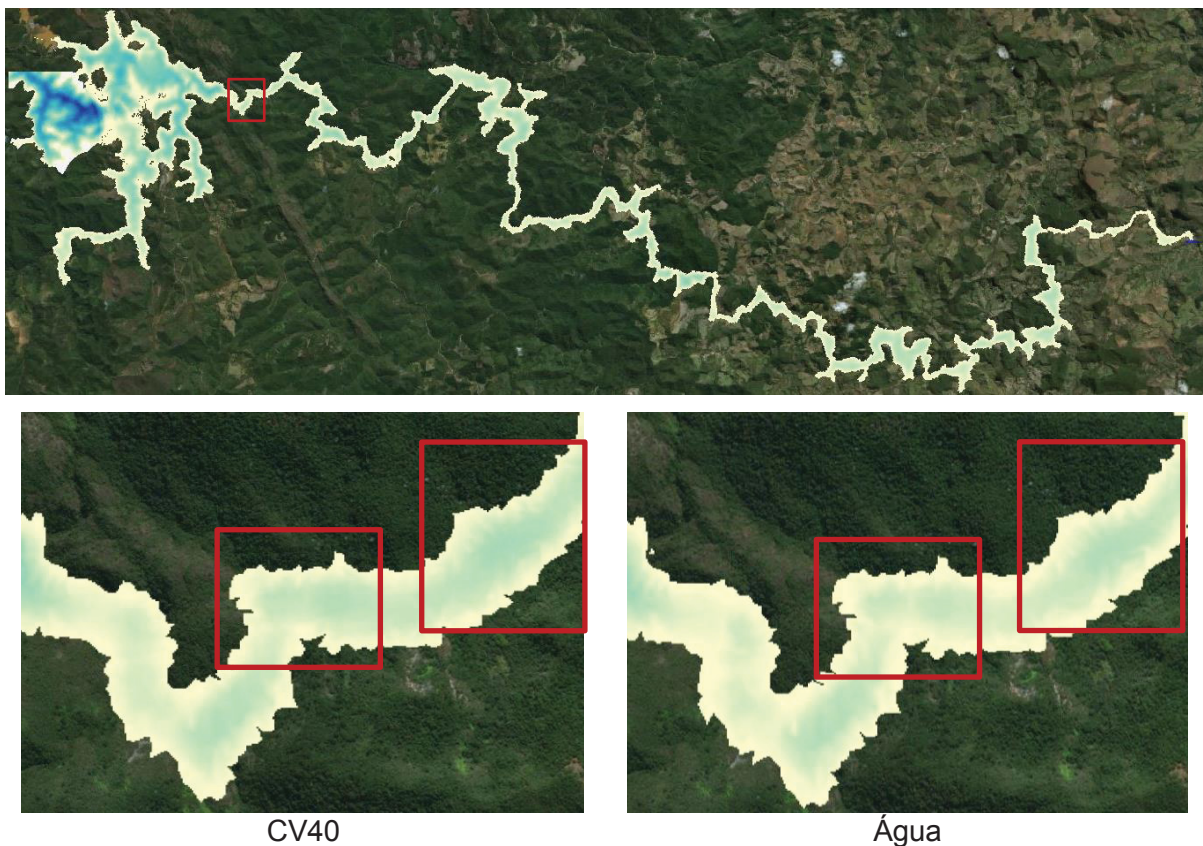


(f) BR40s

FONTE: O autor (2020)

Novamente a condição com CV40 mostrou-se com maiores valores de profundidades na região a jusante mais próxima da barragem, entretanto para regiões mais afastadas as profundidades são menores. As diferenças em regiões específicas foram pequenas, não havendo muita alteração com relação ao cenário utilizando água. A FIGURA 94 ilustra um destes casos.

FIGURA 94 – DIFERENÇAS DOS RESULTADOS PARA PROFUNDIDADE



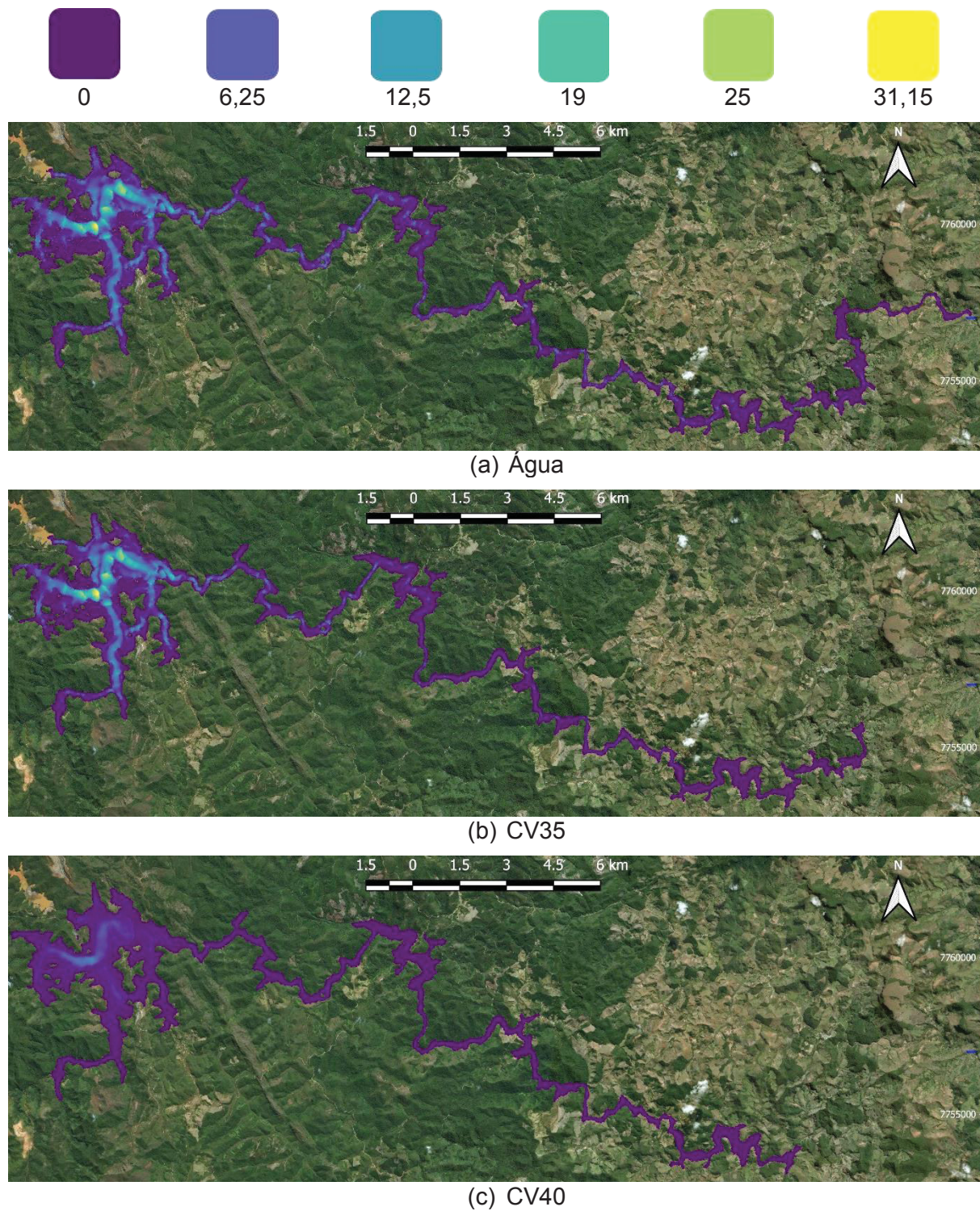
CV40

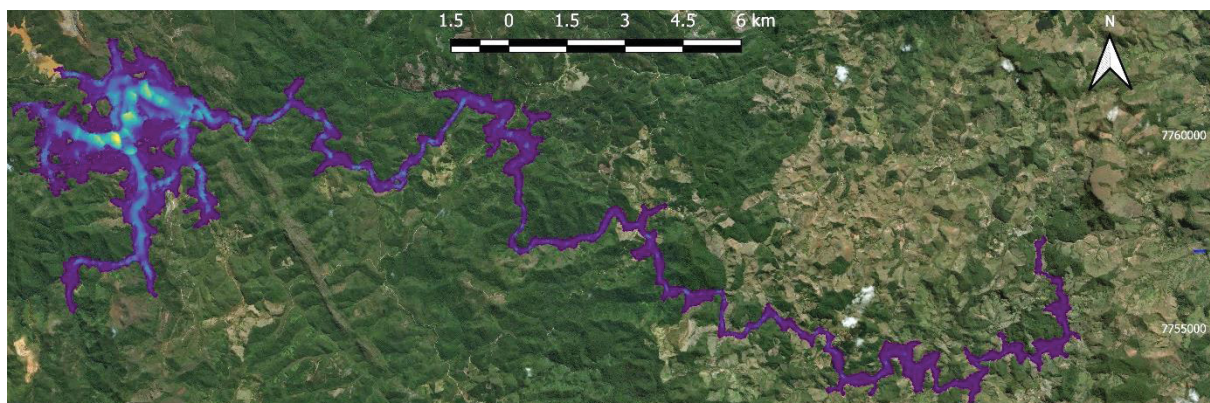
Água

FONTE: O autor (2020)

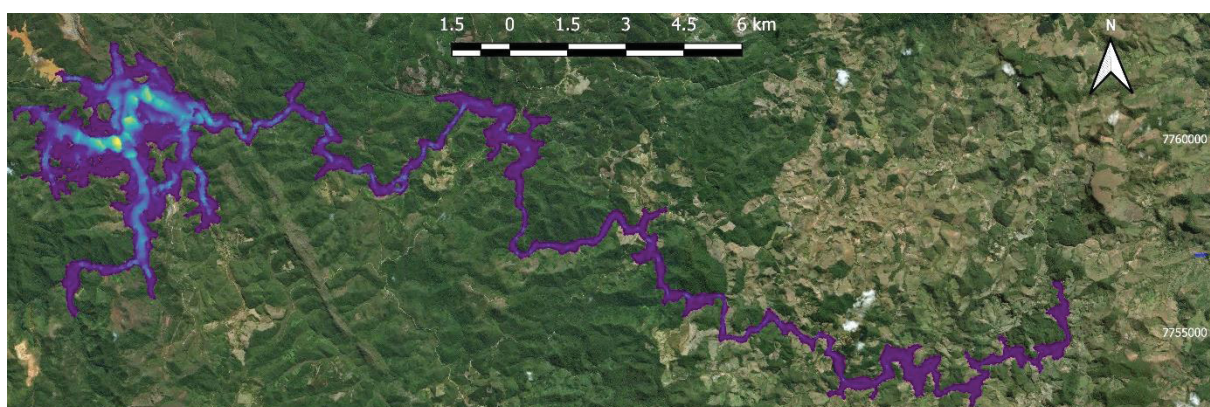
Para os resultados das velocidades existe diferenças que podem ser notadas pela FIGURA 95.

FIGURA 95 – RESULTADOS NUMÉRICOS DA VELOCIDADE MÁXIMA (m/s) PARA EL. 840m

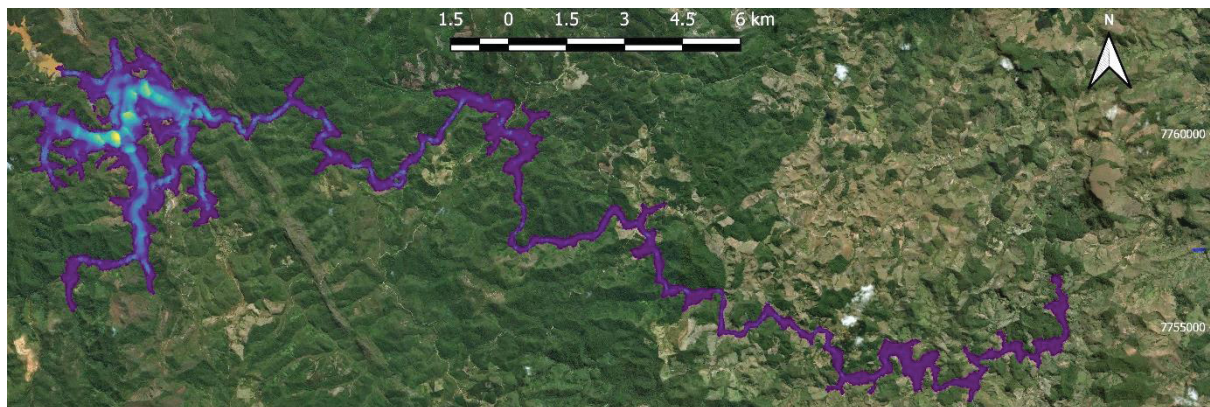




(d) BR35



(e) BR40f

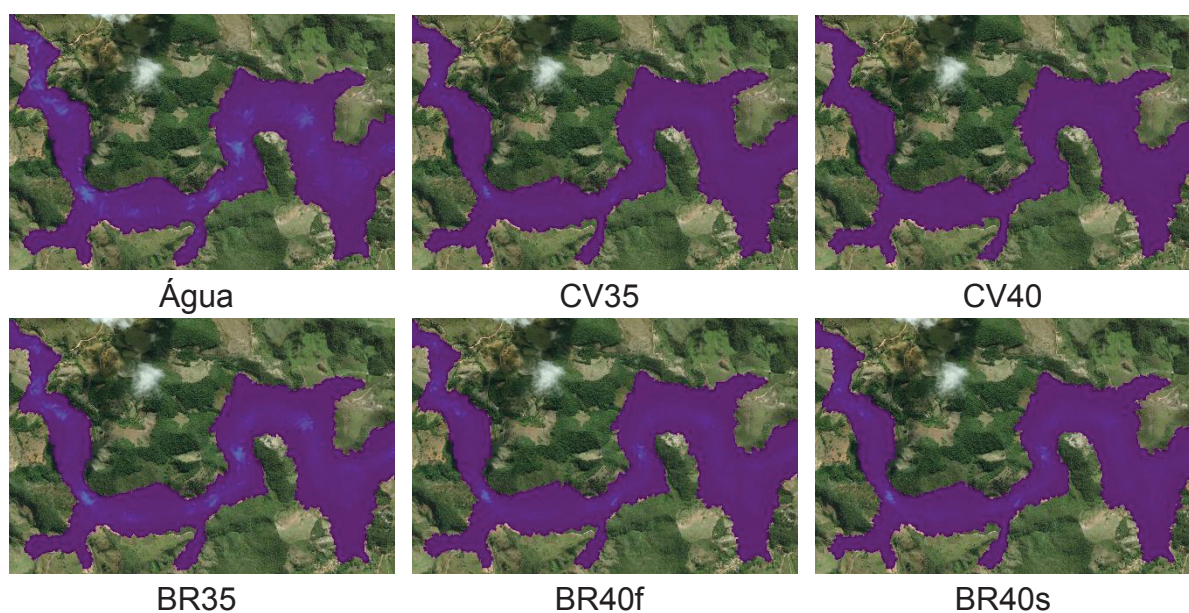


(f) BR40s

FONTE: O autor (2020)

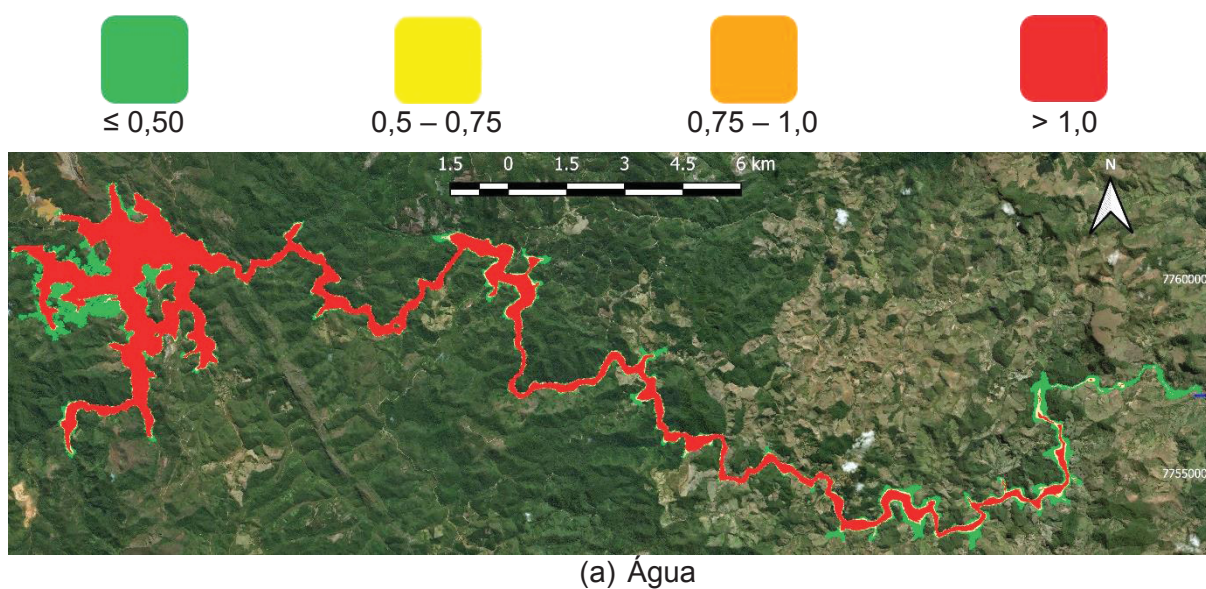
Os materiais mais fluidos apresentam velocidades maiores e similares no início do escoamento, como já esperado, tendo em vista os resultados anteriores. Porém, após uma distância de propagação, essas diferenças começam a ser notadas quaisquer cenários, como pode ser percebido na FIGURA 96, retirada de um local a aproximadamente 34,5 km da barragem.

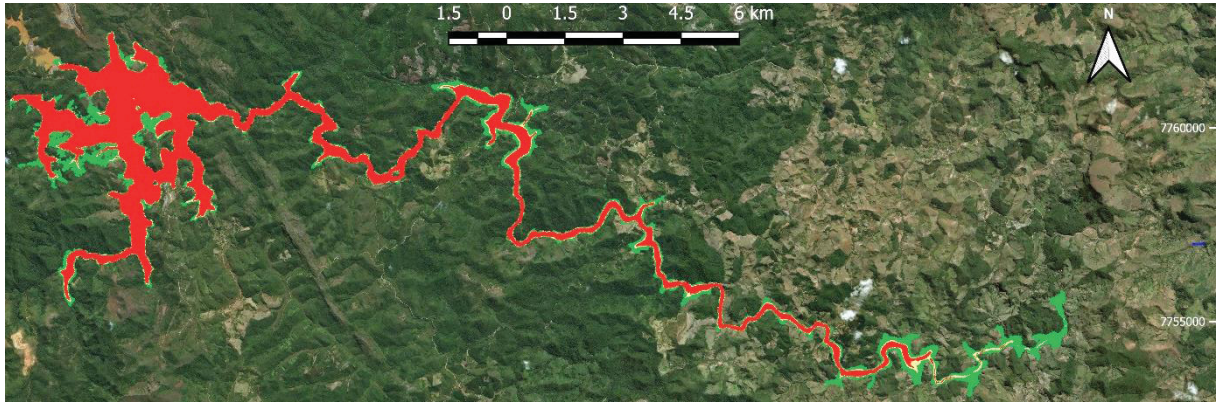
FIGURA 96 – DETALHE COMPARATIVO VELOCIDADES PARA EL. 840m



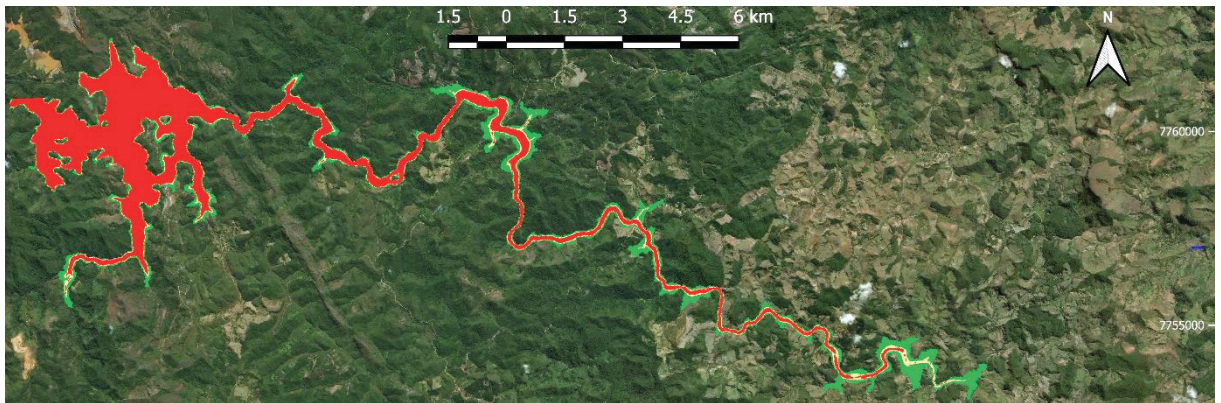
FONTE: O autor (2020)

Nota-se que a água apresenta velocidades superiores aos outros escoamentos, sendo seguida pelo BR35. Já BR40f e BR40s apresentam resultados parecidos e valores superiores aos casos CV35 e CV40. Essa diferença de velocidade associada a profundidade, pode oferecer risco para a população, sendo isso observado no risco hidrodinâmico, apresentado as seguir (FIGURA 97).

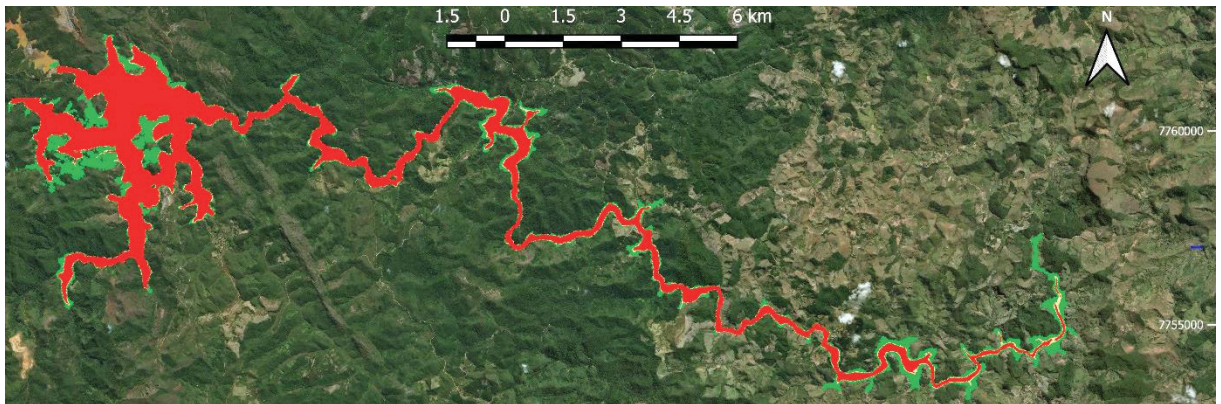
FIGURA 97 – RESULTADOS NUMÉRICOS DO RISCO HIDRODINÂMICO (m^2/s) PARA EL. 840m



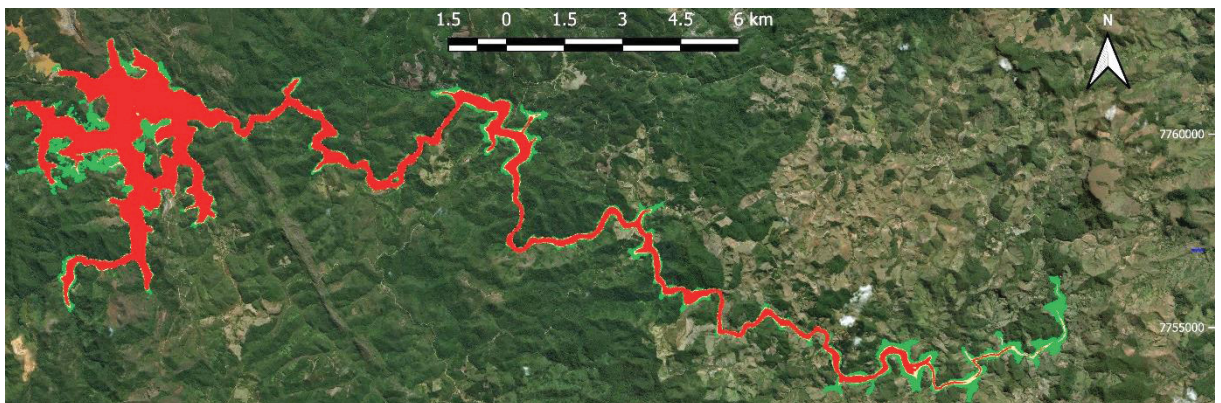
(b) CV35



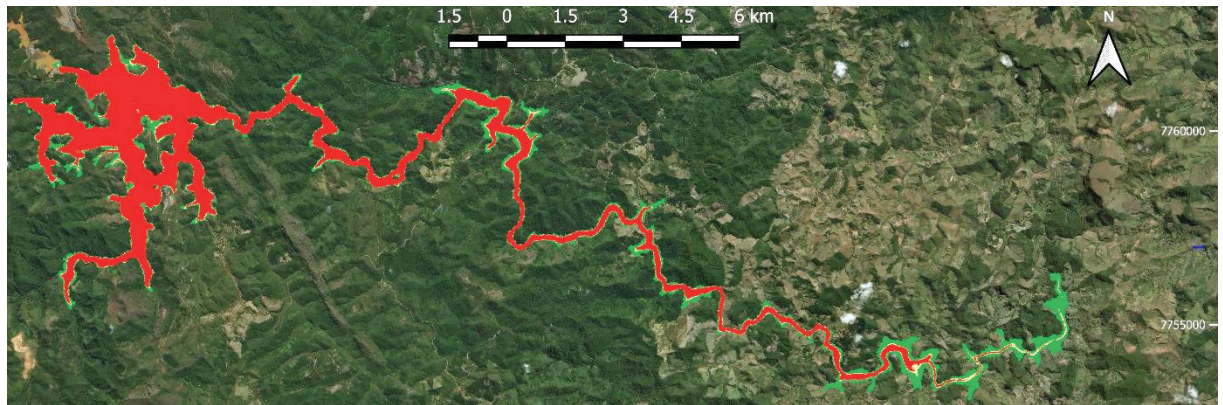
(c) CV40



(d) BR35



(e) BR40f



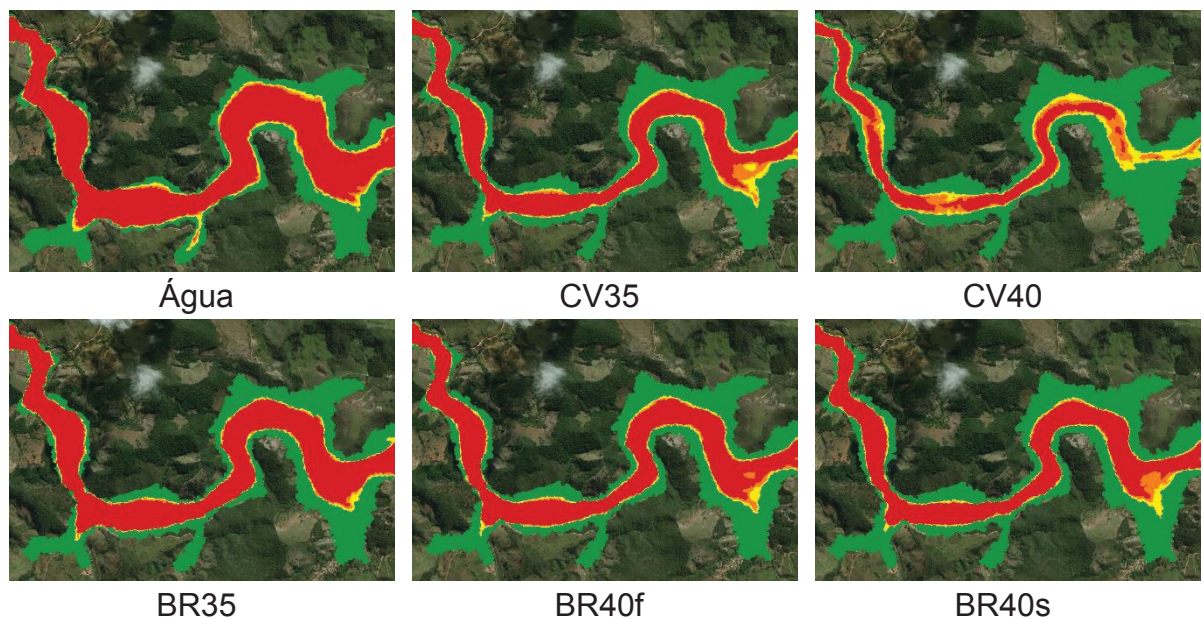
(f) BR40s

FONTE: O autor (2020)

Em termos de análise macro, é possível verificar que em qualquer modelo, o fluxo apresenta uma pequena região com risco baixo (verde), ou seja, menor que $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$. Portanto, em termos gerais, qualquer situação poderia atentar gravemente contra a vida humana. Entretanto, ressalta-se que existe diferenças sutis entres os modelos.

Agregando relacionando a profundidade com a velocidade (FIGURA 96), tem-se os detalhes para o risco hidrodinâmico na EL. 840m (FIGURA 98). Nesse dado é possível notar que as diferenças são mais expressivas.

FIGURA 98 – DETALHE COMPARATIVO PARA O RISCO HIDRODINÂMICO NA EL. 840m

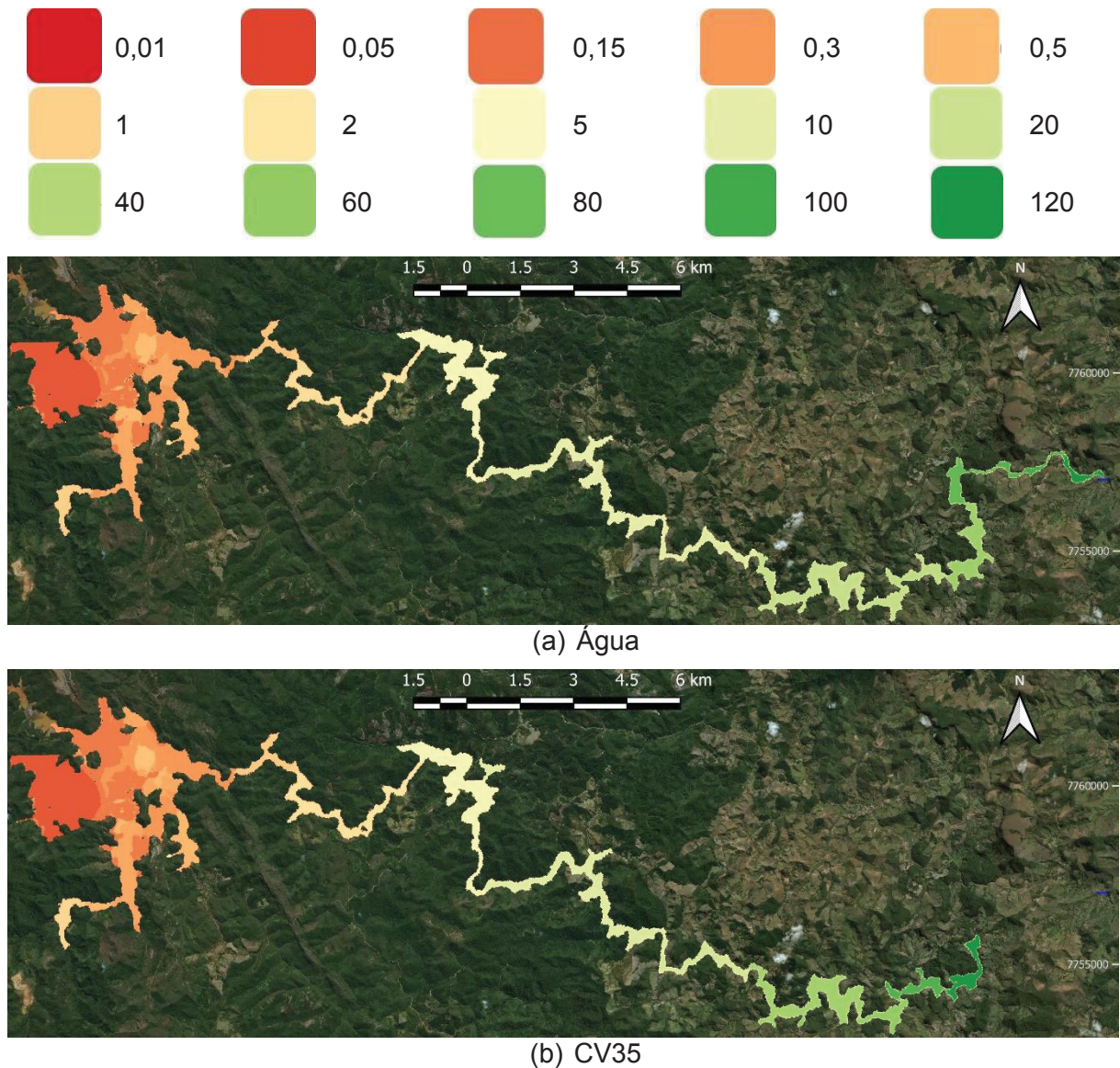


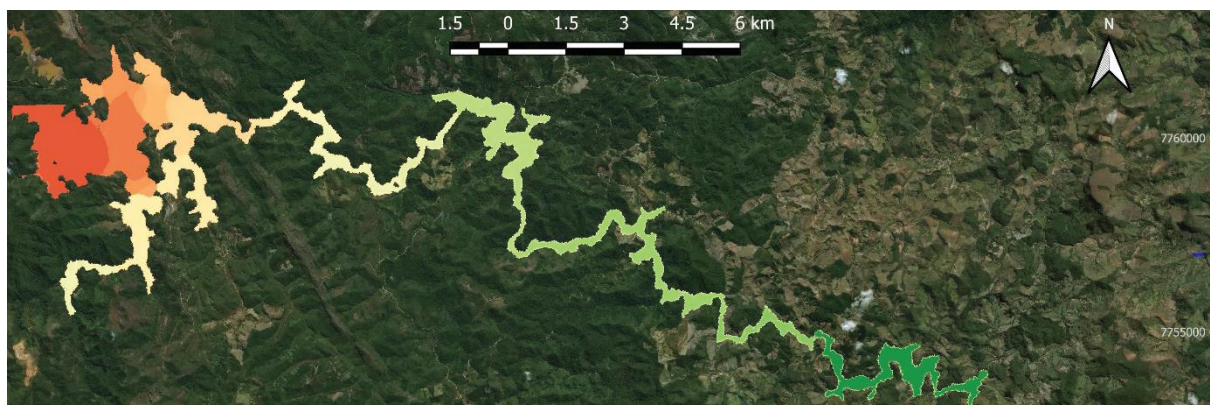
FONTE: O autor (2020)

Pelos resultados, os fluxos menos viscosos apresentaram um risco mais largo, sendo a água o cenário mais crítico. Existem diferenças entre o BR40f e BR40s, onde o segundo apresenta uma região alaranjada maior, ou seja, nesses locais existe um risco hidrodinâmico entre $0,75 \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$. Já a primeira situação possui valores acima de $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ (vermelho) O CV40 apresenta a faixa vermelha mais estreita e no seu final (Leste) os valores já estão no nível laranja ou amarelo.

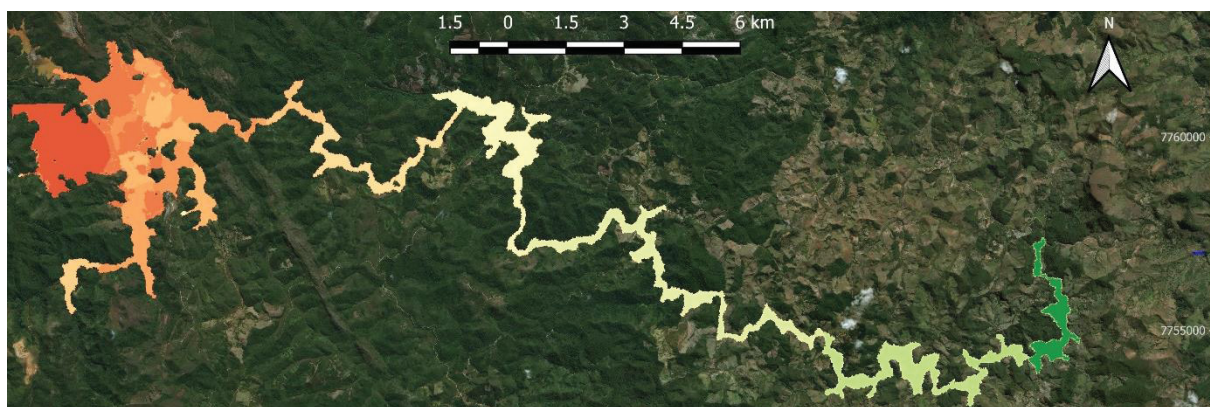
Também é necessário analisar quanto tempo demora até que o nível de inundação atinja seu máximo; isso é apresentado na FIGURA 99. Nota-se que existem grandes diferenças nos resultados, principalmente mais a jusante da barragem.

FIGURA 99 – RESULTADOS PARA TEMPO PARA NÍVEL MÁXIMO (EM HORAS) PARA EL. 840m

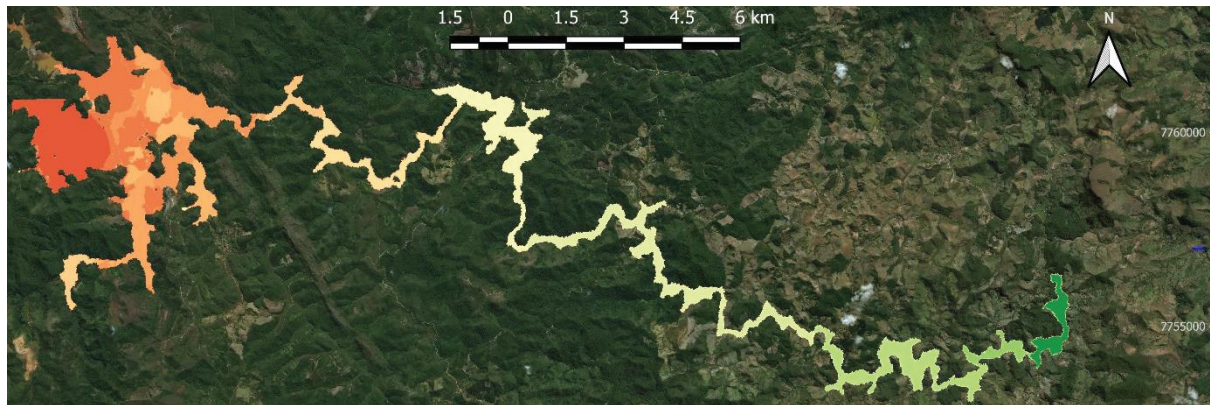




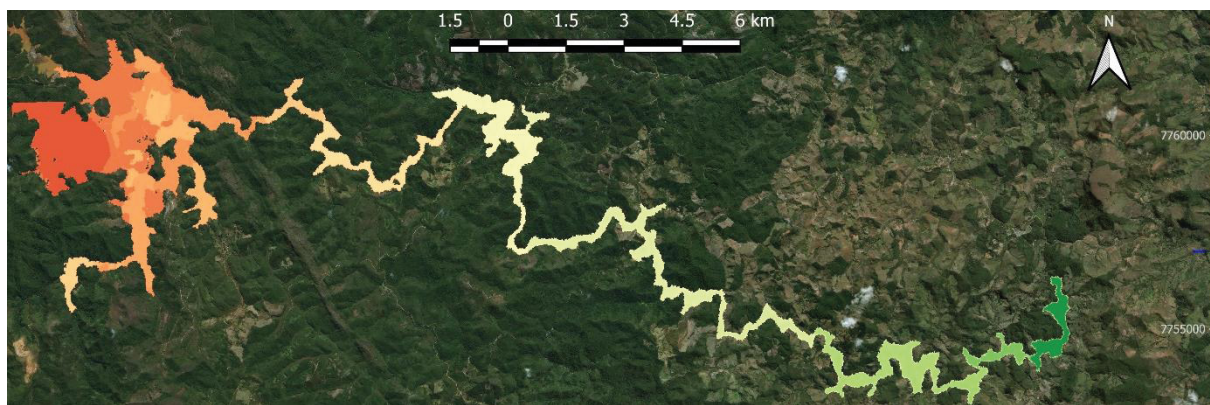
(c) CV40



(d) BR35



(e) BR40f

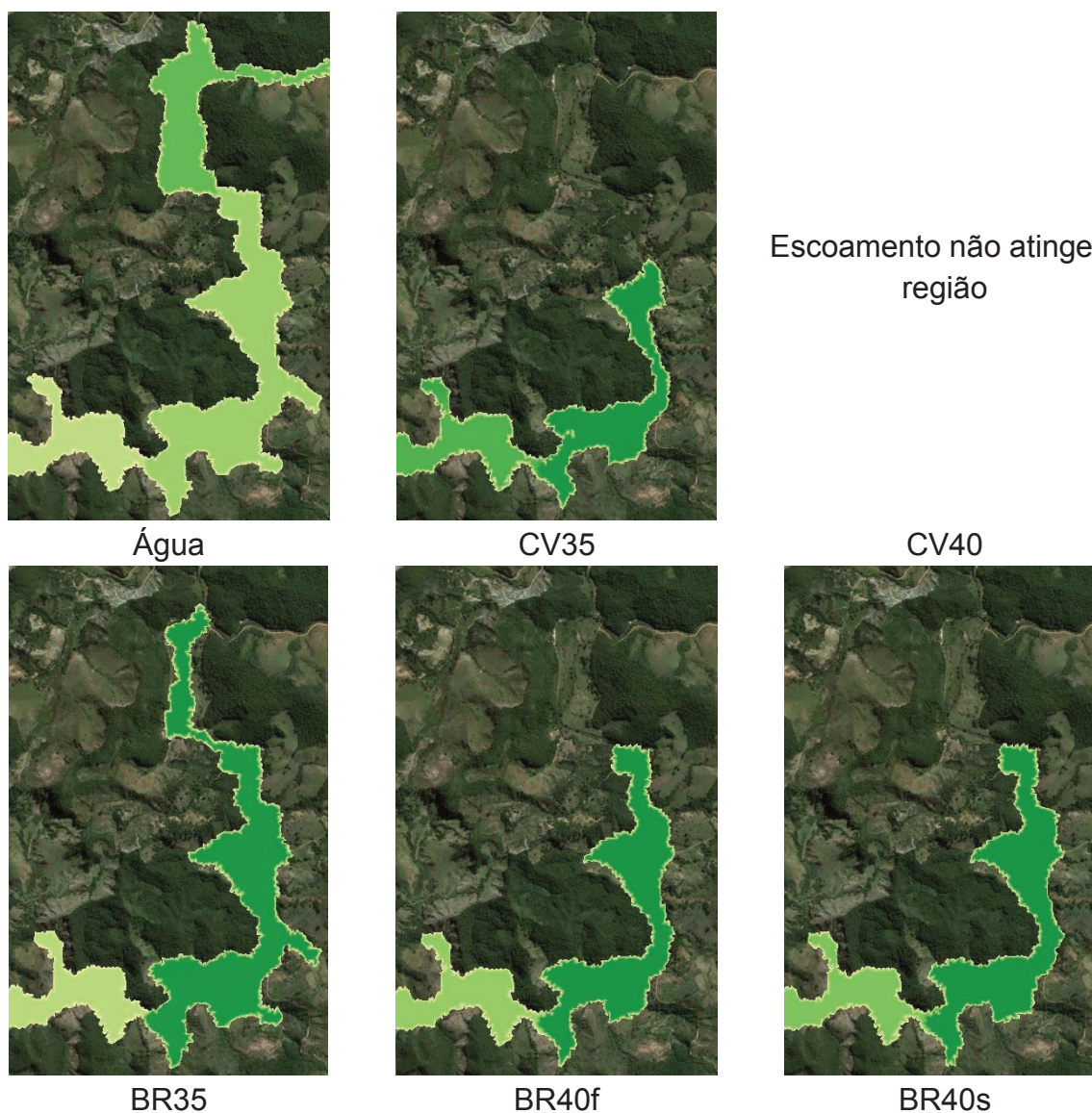


(f) BR40s

FONTE: O autor (2020)

Para os cenários apontados, o início do escoamento não apresenta disparidades grandes entre os resultados, exceto os obtidos pelo CV40. Já para a região a jusante, existe um ponto no qual os escoamentos começam a convergir para 120h, como ilustra a FIGURA 100. Essa zona só não apresenta resultado similar para o CV40 (cujo final do escoamento é a montante) e para a água (cujo final é depois). Além disso, a montante desse ponto o material demora mais para chegar, fato observado pela coloração mais escura que para as amostras CV35, BR40f e BR40s.

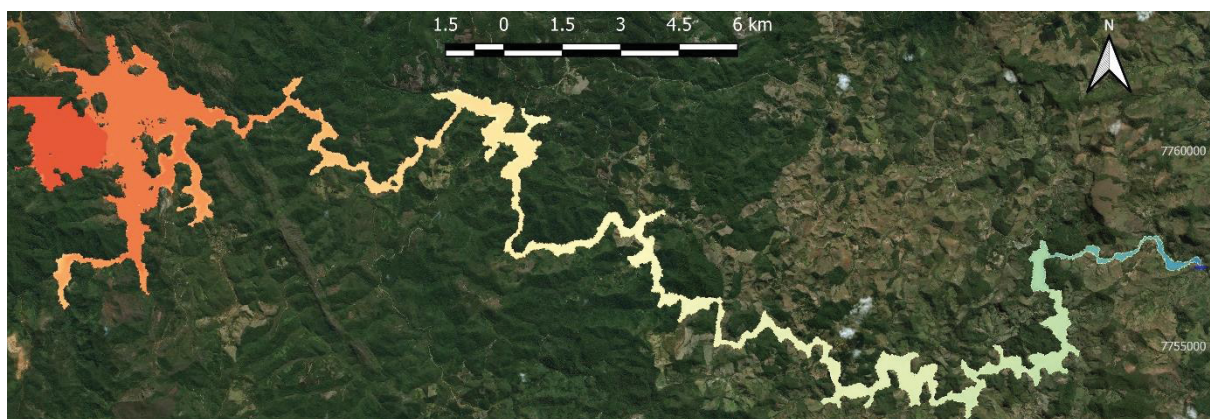
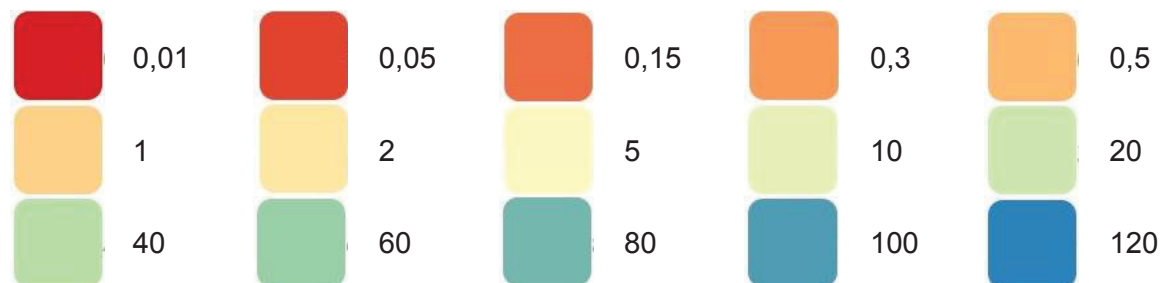
FIGURA 100 – DETALHE DO TEMPO PARA A COTA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO SEJA ATINGIDA NA EL. 840m



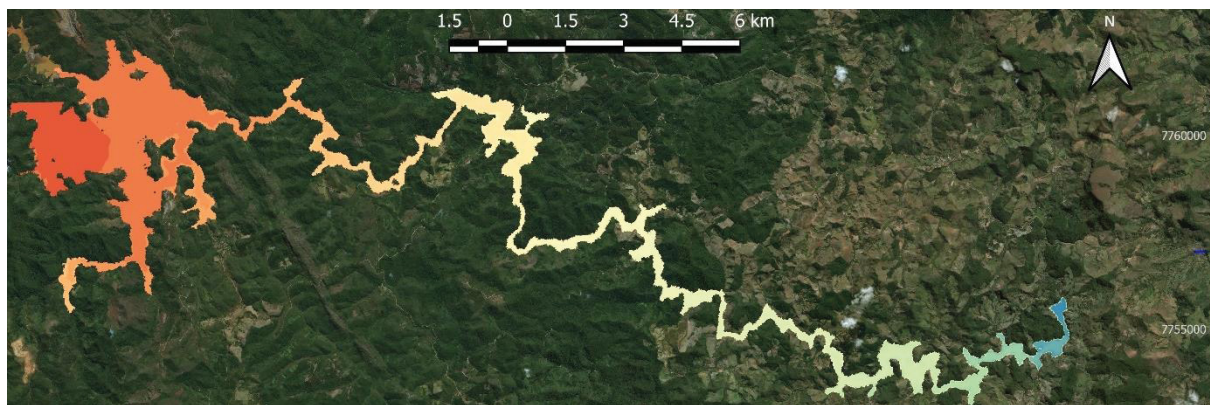
FONTE: O autor (2020)

O último aspecto a ser analisado é o tempo para a chegada da onda, este apresentado a seguir pela FIGURA 101.

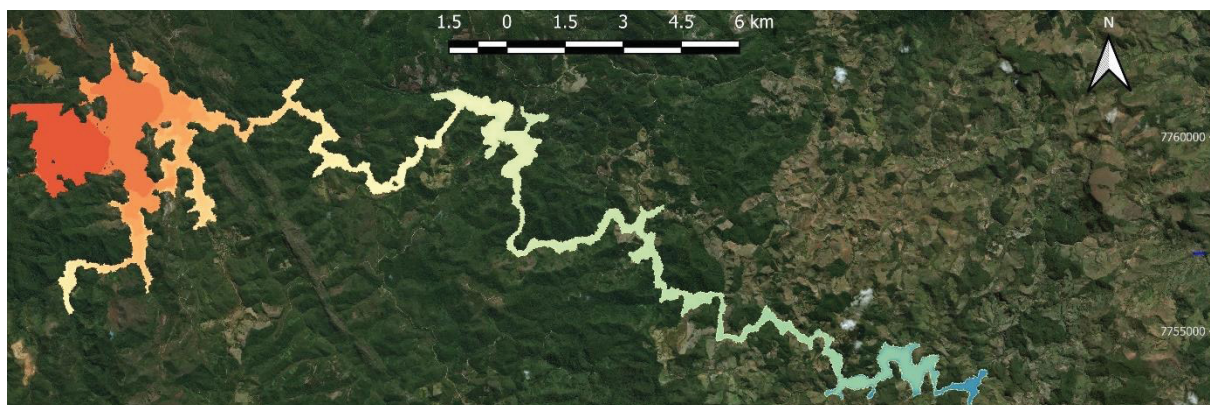
FIGURA 101 – RESULTADOS PARA O TEMPO CHEGADA DA ONDA (HORAS) PARA EL. 840m



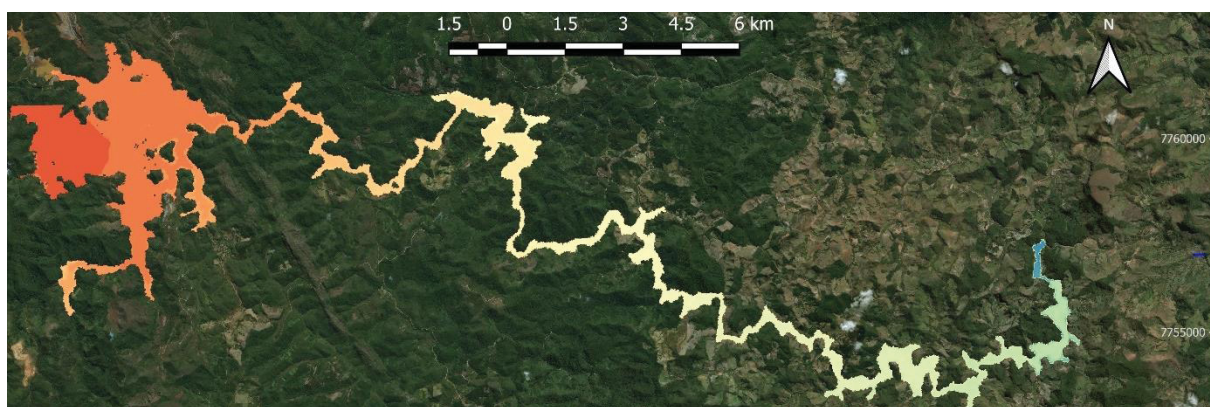
(a) Água



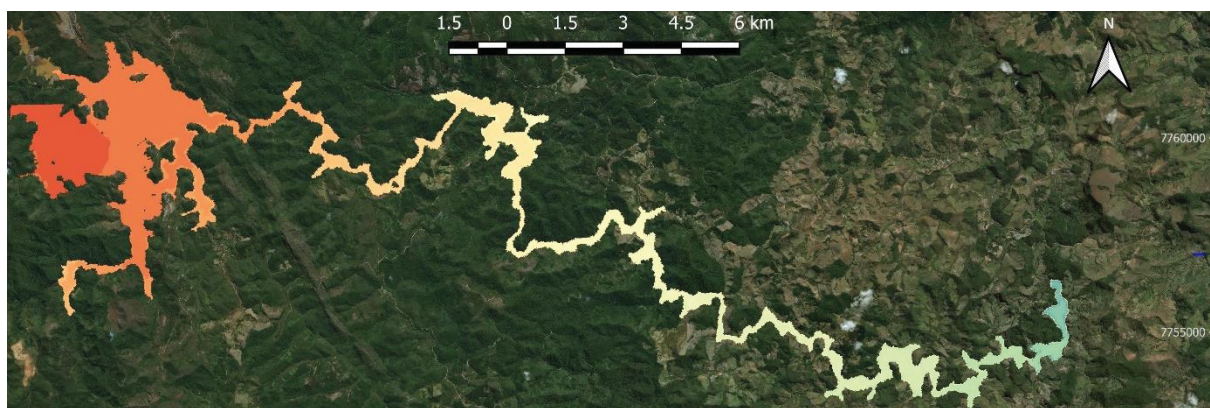
(b) CV35



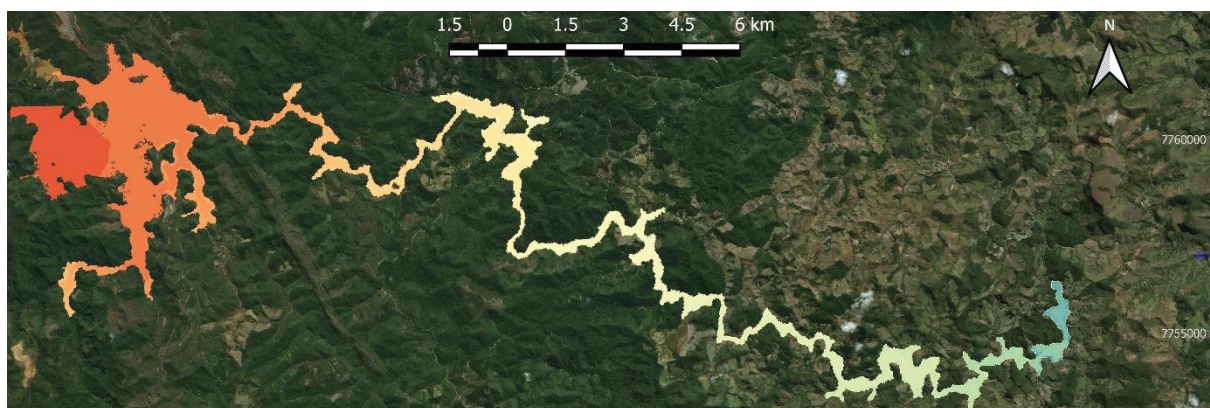
(c) CV40



(d) BR35



(e) BR40f



(f) BR40s

FONTE: O autor (2020)

Para essa análise nota-se uma similaridade entre os materiais, com exceção do CV40 e da distância percorrida. Porém, observando de maneira macro, não é possível notar diferenças significativas no escoamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou prever o escoamento gerado pelo rompimento de uma barragem hipotética de rejeitos em várias elevações, buscando comparar as diferenças nos resultados para os diferentes materiais e concentrações volumétricas utilizados. Os materiais usados na análise foram um solo argiloso do Norte do Paraná e uma amostra coletada em campo após o rompimento da barragem B-I no Córrego do Feijão em Brumadinho/MG, predominantemente siltoso. Esses materiais foram considerados como constituintes de uma barragem hipotética onde foi utilizado o relevo da região de Mariana/MG.

Os materiais utilizados para as comparações foram a água pura, material argiloso com concentrações volumétricas de 35% e 40%, e o material de Brumadinho (siltoso) com as mesmas concentrações. O material de Brumadinho com 40% de concentração foi analisado sob dois modelos reológicos distintos, Bingham simplificado e completo, em virtude de os resultados dos ensaios possibilitarem essa interpretação.

Após estabelecer os parâmetros por meio de ensaios em laboratório, foram simuladas as situações dos rompimentos. As simulações foram feitas no *software* RiverFlow2D, com uma malha de 30 metros, condição de contorno de jusante a 50 km do barramento e condição de jusante o reservatório inteiro da barragem. Os termos de resistência foram o coeficiente de Manning para a situação com água e para a situação com fluido não newtoniano, foram os parâmetros obtidos nos ensaios aplicados nas formulações de Bingham Completo e Bingham Simplificado do *software* RiverFlow2D.

Com isso, conclui-se que quanto mais concentrado o material, menor é seu deslocamento longitudinal. No entanto o deslocamento transversal é maior. Isso resulta em níveis mais altos, atingindo regiões mais elevadas, principalmente no início do escoamento.

Além disso, notou-se que o material argiloso apresentou um comportamento menos fluido que o material siltoso com a mesma concentração. Influí na análise a densidade do material, muito maior para o caso de Brumadinho (material siltoso, obtido como rejeito de minério de ferro).

Na comparação dos modelos reológicos de Bingham simplificado e completo para o material siltoso com concentração volumétrica de 40%, os resultados

apresentaram pequenas diferenças. Pode-se destacar que elas são mais perceptíveis para situações onde o volume liberado é maior. Em situação onde o barramento é menor, essa alteração já não é tão pronunciada.

A situação com as maiores diferenças entre as simulações – com modelos de Bingham completo ou simplificado – ocorreu para o caso onde a barragem possui a maior elevação, portanto, as disparidades entre os modelos reológicos são mais acentuadas quanto maior for a estrutura do barramento. Entretanto, para os materiais utilizados, os resultados não apresentaram grandes diferenças, apesar das diferenças nas propriedades reológicas. Essas foram em grande parte pontuais e sutis, não produzindo diferenças relevantes em termos de resultados, exceção feita a propagação longitudinal para EL. 840m (máxima). Ressalva-se que apesar de não serem de grandes proporções para as condições avaliadas, as diferenças existem e conforme a situação a ser estudada, deve-se levar em consideração as propriedades reológicas, principalmente para avaliar o tempo de chegada da onda, cota máxima atingida e risco hidrodinâmico.

Essa ressalva deve ser feita em virtude de que os ensaios exigem recursos financeiros, seja para compra de equipamento ou realização em outro local, sendo que os resultados podem gerar simulações mais conservadoras e ir contra a segurança. Em uma situação na qual existem tantas incertezas, como o estudo de propagação de ondas de ruptura de barragens, a tomada de decisão em um cenário menos conservador pode gerar complicações na aplicação do Plano de Ações Emergenciais (PAE). Por essa razão sugere-se como estudos futuros a análise da concentração volumétrica em campo de uma barragem de rejeitos (seja o material sendo disposto no reservatório ou já presente neste).

Também cabe destacar que o estudo realizado nessa dissertação tem a limitação do modelo digital de elevação, no qual a discretização é de 30 em 30 metros. Isso leva a perda na qualidade dos resultados, sendo sempre aconselhável um levantamento topográfico da região para melhor auferir os resultados de simulações numéricas.

Outro aspecto a ser melhor explorado no futuro é a relação entre as características geotécnicas do solo, principalmente com ensaios de Limite de Plasticidade e Limite de Liquidez, com as propriedades reológicas dos materiais.

Recomenda-se, também, em sendo possível, realizar estudos de retroanálise para os casos em Mariana/MG e Brumadinho/MG, buscando determinar os valores do

material constituinte. Procurando não só calibrar os modelos reológicos para propagação, mas também levar em conta que estes acontecimentos tiveram comportamento muito distintos, embora fossem rejeitos de minério de ferro, no mesmo Estado da Federação (Minas Gerais) e do mesmo grupo econômico. Isso pode sugerir que diferenças na composição do material, em especial a densidade e concentração volumétrica, podem conduzir a resultados muito diferentes.

Outro estudo futuro interessante seria estabelecer maneira de determinar o volume liberado em situações de liquefação. Apesar de existirem estudos estabelecendo intervalos, ainda é necessário criar formas para reproduzir o modo com o qual o reservatório é liberado nessa situação (em lamelas, como visto nos comentários do painel técnico de Brumadinho).

Associado a este aspecto, deve-se procurar conhecer e definir os gatilhos para o início da liquefação, cujo resultado é praticamente a liberação instantânea de grande parte do reservatório. Este é um cenário mais desfavorável que a formação de uma brecha em uma barragem de terra, seja pela rapidez do fenômeno, seja pelo tipo de material liberado.

Cabe salientar que o modelo numérico considerado não possui dois aspectos importantes. Primeiro que o material não a sedimentação do material, ou seja, o fluido é homogêneo até o final do seu escoamento, não tendo sedimentação de partículas. Outro ponto de destaque foi que em uma ruptura de barragem com água o material liberado escoava e depois tem a capacidade de infiltrar no solo ou evaporar. Uma ruptura com material de rejeito, após o escoamento, ele permanece depositado, gerando danos ambientais muito maiores que os gerados na ruptura com água. Portanto, questão da segurança em obras com acúmulo de rejeito deve ser estrita, em virtude das consequências em caso de falha.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Encarte especial sobre a bacia do Rio Doce**: Rompimento da barragem em Mariana/MG. Brasília, 2016
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Guia de orientação e formulários do plano de Ação de Emergência – PAE**: Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, vol. 4. Brasília, 2016.
- ALBUQUERQUE, L. H. **Avaliação do comportamento geotécnico de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro através de ensaios de piezocone**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação do Departamento Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), 2004.
- ANDREWS, D.C.A.; MARTIN, G.R. **Criteria for liquefaction of silty soils**. Proc., 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 0312, NZ Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand, 2000.
- ARAÚJO, CECÍLIA BHERING DE **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (RJ), 2006.
- BATES, J. **Barragens de rejeitos**. São Paulo: Signus, 2003.
- BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010. Institui Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema Nacional de informações sobre segurança de barragens, DF, n., 21Set. 2010. Seção 1.
- BEEN, K.; JEFFERIES, M. G.; and HACHEY, J. **The Critical State of Sands**. Géotechnique, Vol. 41, No. 3, pp. 365–381, 1991.
- BLIGHT, G. E.; E BENTEL, G. M. **The behaviour of mine tailings during hydraulic deposition**. Journal of the South African Institute of minning and metallurgy, Johannesburg, s/vol., s/nº, p. 73-86, 1983.

BOGER, D.V. **Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry**. p.57-239. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering. 2013.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BRUNNER, G. **Using HEC RAS for Dam Break Studies**. Davis: USACE, 2014.

BUREAU OF RECLAMATION. **Best practices in dam and levee safety risks analysis**. Washington: USACE/USBR, 2015. p. 1-18. manual técnico

CENTRO DE APOIO CIENTÍFICO EM DESASTRES (CENACID). **Relatório 01: Missão CENACID emergencial para apoio a resposta ao desastre relacionado ao rompimento da barragem de rejeitos da Mina Córrego do Feijão, pertencente a Cia. Vale do Rio Doce, no município de Brumadinho-MG**. Disponível em <http://www.cenacid.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2019/02/Relatório_CENACID-BRU_finalA.pdf>. Acesso em 31 de janeiro de 2020.

CHAMMAS, R. **Nota de Aula do Curso de Barragens de Contenção de Rejeitos**. Ouro Preto-MG, 1989.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Análise de Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 2, n°.2, pp. 91-206. 1997.

COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (ICOLD). **As barragens & a água do mundo**: um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo. 2008.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

CRUZ, P.T. **100 Barragens Brasileiras**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

D'AGOSTINO, L. F. **Praias de barragens de rejeitos de mineração**: características e análises de sedimentação. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Portaria nº 70.389 de 17 de maio de 2017.

DELL'AVANZI, E. **Notas de aula**: Obras geotécnicas. Curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, 2016.

DZUY, N. Q.; BOGER, D. V. Yield stress measurement for concentrated suspensions. **Journal of Rheology**, Vol. 27, Issue 4, p. 321, 1983.

ELETROBRÁS. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 2003.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito construídas por aterro hidráulico**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília (DF), 2000.

FELL, R; MACGREGOR. P; STAPLEDON, D; BELL, G; FOSTER, M. **Geotechnical Engineering of Dams**. Netherlands: CRC Press. Balkema, 2015.

FABIANI, A. L. T. **Notas de aulas**: Escoamento não permanente em canais. Programa de pós-graduação em engenharia de Recursos hídricos e ambiental (PPGERHA). Curitiba, 2018.

FERREIRA, F. de O. **Abordagem matemática de roll waves em escoamentos hiperconcentrados com superfície livre**. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira (SP), 2007.

FOSTER, M.; FELL, R. **A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by piping using event tree methods**. UNICIV Report nº. R377. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales. 1999.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. **Analysis of embankment dam incidents** UNICIV. Report nº. R-374, September 1998. The University of New South Wales, Sydney 2052, Australia. 282 p. 1998.

FUSARO, T. C.; ÁVILA, J. P. de; CAMPELLO, I. C.; PIMENTA FILHO, M. de A. **Avanços no entendimento do risco de erosão interna**. II SGBR Seminário Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeito. Salvador, 2017.

GAIOTO, N. **Introdução ao projeto de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: USP, 2003.

GALINDO, M. S. V., **Desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação da viscosidade de solos**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ), 2013.

GALVÃO, A. R. de V. **Metodologia para implantação de um sistema de disposição de rejeitos em minério de ferro na região do semiárido**: estudo de caso. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal (RN), 2014.

GEOHYDROTECH. **Estudos de ruptura**: Avaliação do Potencial de Danos. Rio Paracatu Mineração S. A. - Barragem Morro do Ouro – Etapa 20. 2010.

GEOMECÂNICA & NORWEGIAN GEOTECHNICAL INSTITUTE. **Ruptura da Barragem do Fundão em 5 de novembro de 2015**: Avaliação das causas da ruptura. Relatório elaborado pela Geomecânica & Norwegian Geotechnical Institute, com parceria do Ministério Público de Minas Gerais, no setor NUCAM (Núcleo de Resoluções de Conflitos Ambientais), 135 p. 26 de abril de 2016.

GOLDER ASSOCIATES BRASIL CONSULTORIA E PROJETOS. **Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão**. Relatório Técnico nº RT-023_159-515-2282_00-J. Belo Horizonte. 2732 p. 2016

GOMES, J.; VEIGA, B. V.; ROMERO, A.; GUERRA, A. A. **Investigação da influência dos parâmetros definidores de formação da brecha de ruptura de uma barragem sobre o hidrograma de cheia a jusante**. XXX Seminário Nacional de grandes barragens, Foz do Iguaçu, 2015.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. **Procedures and methods for liquefaction assessment using GeoStudio 2007**. Calgary, Alberta, Canada, 2007.

HYDRONIA LLC. Dam Break and Tailings Dam Breach Flood Simulations. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=d26fCRXI1JM>>. Acesso: 26 nov. 2018.

HYDRONIA LLC. **RiverFlow2D**: two-dimensional flood and river dynamics model – reference manual. Pembroke Pines, Florida, 2018.

JEYAPALAN, J., DUNCAN, J. & SEED, H. **Analyses of Flow Failures of Mine Tailings Dams**. Jour. Geotech. Eng. Vol. 109, No. 2. p. 150-171. 1983.

JOHNSON, A. M. **Physical processes in geology**. Freeman, Cooper, San Francisco, 1970.

KRAMER, S.L. **Geotechnical Earthquake Engineering**. Pretince-Hall, Upper Saddle River New Jersey. 1996.

LAZARIM, T. P. **Espalhamento de rejeitos em cenários de ruptura de barragens** – Simulações em modelo reduzido e proposta de avaliação de área atingida. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2015.

LUCIA, P. **Review of Experiences with Flow Failures of Tailings Dams and Waste Impoundments**. Ph.D dissertation. University of California. Berkeley. 1981

LUZ, A.U.; SAMPAIO J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MACDONALD, T. C.; LANGRIDE-MONOPOLIS, J. Breaching characteristics of dam failures. **Journal of Hydraulic Engineering**, Vol. 110, No. 5, p. 567-586, 1984.

MACHADO, N. C. **Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), 2017.

MACIEL, G. de F.; SANTOS, H. K. dos; FERREIRA, F. de O. **Rheological Analysis of Water Clay Compositions in Order to Investigate Mudflows Developing in Canals**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering; v. 31, n. 1, p. 64-74, JAN-MAR 2009.

MASCARENHAS, F. C. B. **Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ), 1990.

MELO, C.; SHARMA, S. Seismic Coefficients for pseudoelastic slope analysis. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canada. Agosto (2004) Paper no. 369.

MELO, D. F. M. de. **Comportamento Reológico de Solos Sujeitos a Corridas de Lama por Liquefação Estática**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 2014.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (MI). **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília, p.138. 2002.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. **Fundão Tailings Dam Review Panel**. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão

Dam. 2016. 88 p. Disponível em: <<http://fundaoinvestigation.com/>>. Acesso em: 27 março 2016.

NAEF, D.; RICKENMANN, D.; RUTSCHMANN, P.; MCARDELL, B. W. **Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model**. Natural Hazards and Earth System Sciences. 6, 155–165, 2006.

NASCIMENTO, R. **Reologia e reometria aplicadas ao estudo de polpas minerais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 53p. (Série Rochas e Minerais Industriais, 12). 2008

NIERWINSKI, H. P. **Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de mineração**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), 2019.

OLIVEIRA; W. L.; ABRÃO, P. **Disposição de rejeitos de mineração**. In: ZUQUETTE, L. V. Geotecnia Ambiental. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. p. 263-306.

OLSON, S. M.; STARK, T. D. Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure case histories. **Canadian Geotechnical Journal**. Issue 39, p. 629-647, 2002.

OVALEZ, G.; BERTRAND, F.; COUSSOT, P.; CHATEAU, X. Shear-induced sedimentation in yield stress fluids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**. V. 177-178, p. 19-28, 2012.

PIMENTA FILHO, M. de A. **Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios**. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas, Belo Horizonte (MG), 2013.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4 ed. São Paulo: EESC-USP, 2006.

RIBEIRO, V. Q. F. **Proposta de metodologia para avaliação de rupturas de estruturas de disposição de rejeitos**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-

Graduação Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), 2015.

ROBERTSON, P. K.; MELO, L. DE.; WILLIAMS, D. J., WILSON, G. W. **Relatório do painel de especialista sobre causas técnicas do rompimento da barragem B-I do Córrego do Feijão.** 2019. 88p. Disponível em: <<http://www.b1technicalinvestigation.com/report.html>>. Acesso em: 14 dezembro 2019.

ROCHA, F. F. **Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil.** Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), 2015.

SEED, R.B.; CETIN, K.O.; MOSS, R.E.S.; KAMMERER, A.M.; WU, J.; PESTANA, J.M.; RIEMER, M.F.; SANCIO, R.B.; BRAY, J.D.; KAYEN, R.E.; FARIS, A. **Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework.** University of California, Berkley, 2003.

SLADEN, J.A.; D'HOLLANDER, R.D.; KRAHN, J. The liquefaction of sands, a collapse surface approach. **Canadian Geotechnical Journal**, 22, p. 564-578, 1985

SOARES, L. **Barragem de rejeitos.** In: LUZ, A.U.; SAMPAIO J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de Minérios. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. pp. 831-888.

SOUZA JUNIOR, T. F. de. **Estudo para avaliação do volume de rejeito liberado do reservatório em cenário de ruptura de barragem.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba (PR), 2018.

TAKAHASHI, T. **Debris Flow: mechanics, prediction, and countermeasures.** Taylor & Francis. London, 2007.

TEIXEIRA, S. H. C. **Notas de aula: Barragens de terra e enrocamento**. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

TRONCOSO, J. H. **Geotechnics of tailings dams and sediments**. International congress of environmental geotechnics, 18, p. 1405-1423. Lisboa. Anais. Lisboa: ICEG. 1997.

SERAFIM, J.L. Safety of dams judged from failures. **Int. Water Power & Dam Construction**, v. 33, n.12, p. 32-35, 1981.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Design and evaluation of tailings dams**. 1994, Washington, USA, p. 59. Relatório Técnico.



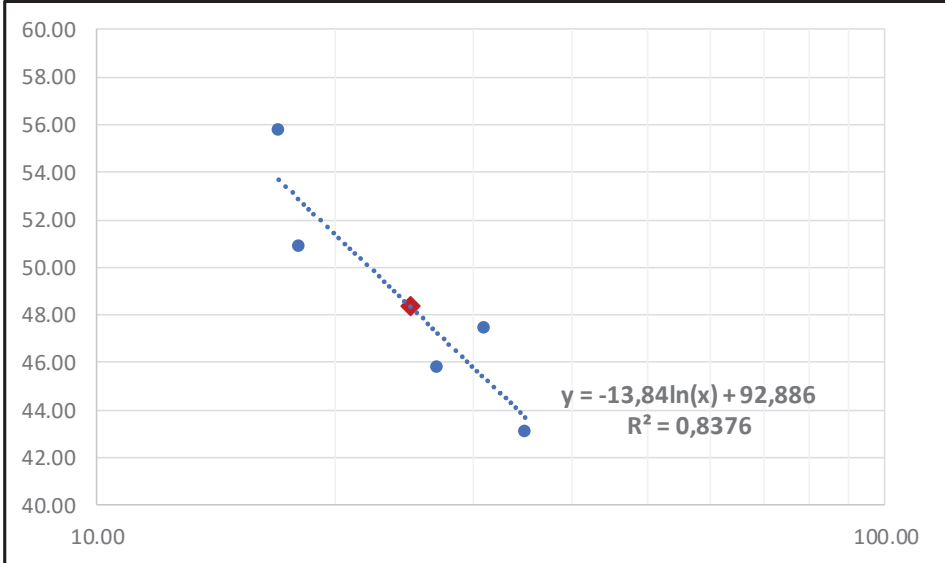
VICK, S. G. **Inundation Risk from Tailings Dam Flow Failures**. IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. III, Viña del Mar-Chile. 1991.

WISEU, M. T. F. **Segurança dos vales a jusante de barragens: metodologias de apoio à gestão do risco**. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.



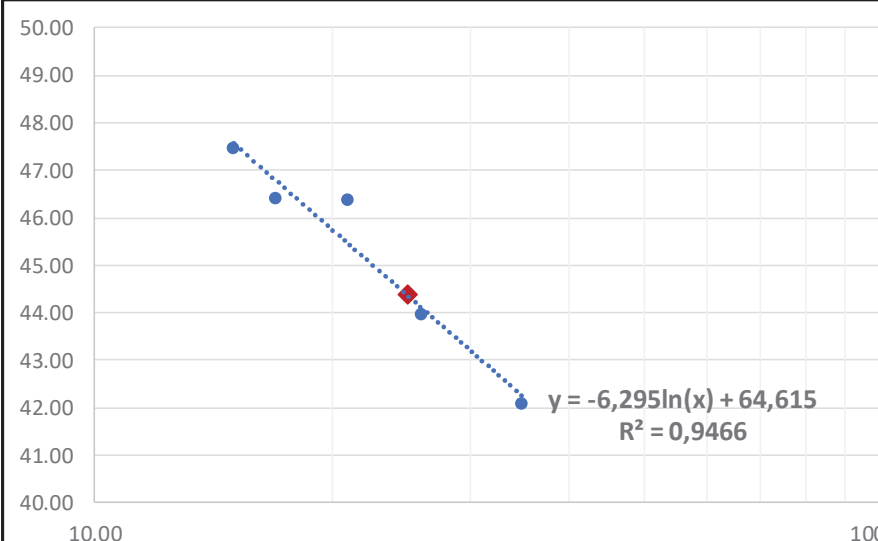
WAHL, T. L. **The uncertainty of embankment dam breach parameter predictions based on dam failure case studies**. USDA/FEMA Workshop on Issues, Resolutions and Research Needs Related on Dam Failure Analysis. Oklahoma, p.1-16. 2001.

WANG, W. **Some findings in soil liquefaction**. Research Report, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, 1979.




APÊNDICE 1 – ENSAIO LIMITE DE LIQUIDEZ (AMOSTRA 1)

	LIMITE DE LIQUIDEZ ABNT NBR 6459:1984																																					
<p style="text-align: center;">IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: <u>Amostra 1</u></p> <p style="text-align: center;">DATA DO ENSAIO: <u>4/12/2019</u></p> <p style="text-align: center;">EXECUTADO POR: <u>Cezar Falavigna Siva</u></p>																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Número cápsula</th> <th>Massa cápsula (g)</th> <th>Massa cápsula + solo úmido (g)</th> <th>Massa cápsula + solo seco (g)</th> <th>Umidade (%)</th> <th>N_{Golpes}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30</td> <td>14.80</td> <td>57.58</td> <td>44.70</td> <td>43.08</td> <td>35.00</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>36.27</td> <td>73.26</td> <td>61.65</td> <td>45.74</td> <td>27.00</td> </tr> <tr> <td>75</td> <td>14.30</td> <td>53.96</td> <td>41.20</td> <td>47.43</td> <td>31.00</td> </tr> <tr> <td>465</td> <td>36.77</td> <td>86.54</td> <td>69.77</td> <td>50.82</td> <td>18.00</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>14.38</td> <td>57.37</td> <td>41.98</td> <td>55.76</td> <td>17.00</td> </tr> </tbody> </table>			Número cápsula	Massa cápsula (g)	Massa cápsula + solo úmido (g)	Massa cápsula + solo seco (g)	Umidade (%)	N _{Golpes}	30	14.80	57.58	44.70	43.08	35.00	6	36.27	73.26	61.65	45.74	27.00	75	14.30	53.96	41.20	47.43	31.00	465	36.77	86.54	69.77	50.82	18.00	7	14.38	57.37	41.98	55.76	17.00
Número cápsula	Massa cápsula (g)	Massa cápsula + solo úmido (g)	Massa cápsula + solo seco (g)	Umidade (%)	N _{Golpes}																																	
30	14.80	57.58	44.70	43.08	35.00																																	
6	36.27	73.26	61.65	45.74	27.00																																	
75	14.30	53.96	41.20	47.43	31.00																																	
465	36.77	86.54	69.77	50.82	18.00																																	
7	14.38	57.37	41.98	55.76	17.00																																	
																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">EQUAÇÃO</td> <td style="width: 50%;">$-13,84\ln(x) + 92,886$</td> </tr> <tr> <td>GOLPES</td> <td>25.00</td> </tr> <tr> <td>LL(%)</td> <td>48.34</td> </tr> </table>			EQUAÇÃO	$-13,84\ln(x) + 92,886$	GOLPES	25.00	LL(%)	48.34																														
EQUAÇÃO	$-13,84\ln(x) + 92,886$																																					
GOLPES	25.00																																					
LL(%)	48.34																																					




APÊNDICE 2 – ENSAIO LIMITE DE LIQUIDEZ (ENSAIO 2)

	LIMITE DE LIQUIDEZ ABNT NBR 6459:1984																																								
<p style="text-align: center;">IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: <u>Amostra</u></p> <p style="text-align: center;">DATA DO ENSAIO: <u>4/12/2019</u></p> <p style="text-align: center;">EXECUTADO POR: <u>Cezar Falavigna Siva</u></p>																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Número cápsula</th> <th>Massa cápsula (g)</th> <th>Massa cápsula + solo úmido (g)</th> <th>Massa cápsula + solo seco (g)</th> <th>Umidade (%)</th> <th>N_{Golpes}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>21</td> <td>36.80</td> <td>51.02</td> <td>46.81</td> <td>42.06</td> <td>35.00</td> </tr> <tr> <td>50/2A</td> <td>19.58</td> <td>27.64</td> <td>25.18</td> <td>43.93</td> <td>26.00</td> </tr> <tr> <td>404</td> <td>20.89</td> <td>32.67</td> <td>28.94</td> <td>46.34</td> <td>21.00</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>14.71</td> <td>25.22</td> <td>21.89</td> <td>46.38</td> <td>17.00</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>26.71</td> <td>41.97</td> <td>37.06</td> <td>47.44</td> <td>15.00</td> </tr> </tbody> </table>						Número cápsula	Massa cápsula (g)	Massa cápsula + solo úmido (g)	Massa cápsula + solo seco (g)	Umidade (%)	N _{Golpes}	21	36.80	51.02	46.81	42.06	35.00	50/2A	19.58	27.64	25.18	43.93	26.00	404	20.89	32.67	28.94	46.34	21.00	16	14.71	25.22	21.89	46.38	17.00	10	26.71	41.97	37.06	47.44	15.00
Número cápsula	Massa cápsula (g)	Massa cápsula + solo úmido (g)	Massa cápsula + solo seco (g)	Umidade (%)	N _{Golpes}																																				
21	36.80	51.02	46.81	42.06	35.00																																				
50/2A	19.58	27.64	25.18	43.93	26.00																																				
404	20.89	32.67	28.94	46.34	21.00																																				
16	14.71	25.22	21.89	46.38	17.00																																				
10	26.71	41.97	37.06	47.44	15.00																																				
																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">EQUAÇÃO</td> <td style="width: 50%;">-6,295ln(x)+64,615</td> </tr> <tr> <td>GOLPES</td> <td>25.00</td> </tr> <tr> <td>LL(%)</td> <td>44.35</td> </tr> </table>						EQUAÇÃO	-6,295ln(x)+64,615	GOLPES	25.00	LL(%)	44.35																														
EQUAÇÃO	-6,295ln(x)+64,615																																								
GOLPES	25.00																																								
LL(%)	44.35																																								




APÊNDICE 3 – ENSAIO LIMITE DE PLASTICIDADE (ENSAIO 1)

	LIMITE DE PLASTICIDADE NBR 7180/1984	 																											
<p style="text-align: right;">IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: <u>Amostra 1</u></p> <p style="text-align: right;">DATA DO ENSAIO: <u>6/4/2019</u></p> <p style="text-align: right;">EXECUTADO POR: <u>Cezar Falavigna Siva</u></p>																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>#</th> <th>Massa cápsula (g)</th> <th>Massa solo úmido (g)</th> <th>Massa solo seco (g)</th> <th>Umidade (ω)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">21</td> <td style="text-align: center;">36.71</td> <td style="text-align: center;">40.28</td> <td style="text-align: center;">39.25</td> <td style="text-align: center;">41%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">88</td> <td style="text-align: center;">14.35</td> <td style="text-align: center;">16.70</td> <td style="text-align: center;">16.23</td> <td style="text-align: center;">25%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">14.37</td> <td style="text-align: center;">16.76</td> <td style="text-align: center;">16.11</td> <td style="text-align: center;">37%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">14.42</td> <td style="text-align: center;">17.09</td> <td style="text-align: center;">16.40</td> <td style="text-align: center;">35%</td> </tr> </tbody> </table>					#	Massa cápsula (g)	Massa solo úmido (g)	Massa solo seco (g)	Umidade (ω)	21	36.71	40.28	39.25	41%	88	14.35	16.70	16.23	25%	7	14.37	16.76	16.11	37%	1	14.42	17.09	16.40	35%
#	Massa cápsula (g)	Massa solo úmido (g)	Massa solo seco (g)	Umidade (ω)																									
21	36.71	40.28	39.25	41%																									
88	14.35	16.70	16.23	25%																									
7	14.37	16.76	16.11	37%																									
1	14.42	17.09	16.40	35%																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">Limite de Plasticidade (LP)</td> <td style="text-align: center;">34%</td> </tr> </table>				Limite de Plasticidade (LP)	34%																								
Limite de Plasticidade (LP)	34%																												

*O ensaio na qual a umidade foi de 25% foi descartado e considerado os resultados abaixo

	LIMITE DE PLASTICIDADE NBR 7180/1984	 																						
<p style="text-align: right;">IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: <u>Amostra 1</u></p> <p style="text-align: right;">DATA DO ENSAIO: <u>6/4/2019</u></p> <p style="text-align: right;">EXECUTADO POR: <u>Cezar Falavigna Siva</u></p>																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>#</th> <th>Massa cápsula (g)</th> <th>Massa solo úmido (g)</th> <th>Massa solo seco (g)</th> <th>Umidade (ω)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">21</td> <td style="text-align: center;">36.71</td> <td style="text-align: center;">40.28</td> <td style="text-align: center;">39.25</td> <td style="text-align: center;">41%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">14.37</td> <td style="text-align: center;">16.76</td> <td style="text-align: center;">16.11</td> <td style="text-align: center;">37%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">14.42</td> <td style="text-align: center;">17.09</td> <td style="text-align: center;">16.40</td> <td style="text-align: center;">35%</td> </tr> </tbody> </table>					#	Massa cápsula (g)	Massa solo úmido (g)	Massa solo seco (g)	Umidade (ω)	21	36.71	40.28	39.25	41%	7	14.37	16.76	16.11	37%	1	14.42	17.09	16.40	35%
#	Massa cápsula (g)	Massa solo úmido (g)	Massa solo seco (g)	Umidade (ω)																				
21	36.71	40.28	39.25	41%																				
7	14.37	16.76	16.11	37%																				
1	14.42	17.09	16.40	35%																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 80%;">Limite de Plasticidade (LP)</td> <td style="text-align: center;">38%</td> </tr> </table>				Limite de Plasticidade (LP)	38%																			
Limite de Plasticidade (LP)	38%																							

APÊNDICE 4 – ENSAIO LIMITE DE PLASTICIDADE (ENSAIO 2)


	LIMITE DE PLASTICIDADE NBR 7180/1984	 																									
<p style="text-align: right; margin-right: 100px;">IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: <u>Amostra 2</u></p> <p style="text-align: right; margin-right: 100px;">DATA DO ENSAIO: <u>6/4/2019</u></p> <p style="text-align: right; margin-right: 100px;">EXECUTADO POR: <u>Cezar Falavigna Siva</u></p>																											
<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 5%;">#</th> <th style="width: 20%;">Massa cápsula (g)</th> <th style="width: 20%;">Massa solo úmido (g)</th> <th style="width: 20%;">Massa solo seco (g)</th> <th style="width: 35%;">Umidade (ω)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;">15.21</td> <td style="text-align: center;">16.43</td> <td style="text-align: center;">16.06</td> <td style="text-align: center;">44%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;">14.13</td> <td style="text-align: center;">15.15</td> <td style="text-align: center;">14.85</td> <td style="text-align: center;">42%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;">14.47</td> <td style="text-align: center;">15.90</td> <td style="text-align: center;">15.53</td> <td style="text-align: center;">35%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;">15.46</td> <td style="text-align: center;">16.79</td> <td style="text-align: center;">16.40</td> <td style="text-align: center;">41%</td> </tr> </tbody> </table>			#	Massa cápsula (g)	Massa solo úmido (g)	Massa solo seco (g)	Umidade (ω)	-	15.21	16.43	16.06	44%	-	14.13	15.15	14.85	42%	-	14.47	15.90	15.53	35%	-	15.46	16.79	16.40	41%
#	Massa cápsula (g)	Massa solo úmido (g)	Massa solo seco (g)	Umidade (ω)																							
-	15.21	16.43	16.06	44%																							
-	14.13	15.15	14.85	42%																							
-	14.47	15.90	15.53	35%																							
-	15.46	16.79	16.40	41%																							
<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">Limite de Plasticidade (LP)</td> <td style="width: 40%; text-align: center;">40%</td> </tr> </table>			Limite de Plasticidade (LP)	40%																							
Limite de Plasticidade (LP)	40%																										

ANEXO 1 – CLASSIFICAÇÃO PARA BARRAGENS DE MINERAÇÃO (DNPM)

ANEXO V


Quadro 1 - Classificação para barragens de mineração

NOME DA BARRAGEM:		
DATA DA CLASSIFICAÇÃO E ENQUADRAMENTO:		
1	CATEGORIA DE RISCO (CRI)	PONTOS
1.1	Características Técnicas (CT)	
1.2	Estado de Conservação (EC)	
1.3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		
CLASSIFICAÇÃO DE RISCO		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	≥ 65 ou $EC^* = 10$ (*)
	MÉDIO	$37 < CRI < 65$
	BAIXO	≤ 37
(*) Pontuação (10) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade providências imediatas pelo responsável da barragem.		
NOME EMPREENDEDOR:		
CLASSIFICAÇÃO PARA BARRAGENS DE MINERAÇÃO		
2	DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)	PONTOS
2.1	Volume total do reservatório	
2.2	Existência de População a Jusante	
2.3	Impacto Ambiental	
2.4	Impacto Sócio-Econômico	
PONTUAÇÃO TOTAL (DPA)		
CLASSIFICAÇÃO DE DANO		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	≥ 13
	MÉDIO	$7 < DPA < 13$
	BAIXO	≤ 7
MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO		

 Departamento Nacional de Produção Mineral				
QUADRO 2 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS)				
1.1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS (CT)				
Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de Projeto (c)	Método Construtivo (d)	Auscultação (e)
Altura ≤ 15m (0)	Comprimento ≤ 50m (0)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (0)	Etapas únicas (0)	Existe instrumentação de acordo com o projeto técnico (0)
15m < Altura < 30m (1)	50m < Comprimento < 200m (1)	Milenar (2)	Alteamento a jusante (2)	Existe instrumentação em desacordo com o projeto, porém em processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (2)
30m ≤ Altura ≤ 60m (4)	200 ≤ Comprimento ≤ 600m (2)	TR = 500 anos (5)	Alteamento por linha de centro (5)	Existe instrumentação em desacordo com o projeto sem processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (6)
Altura > 60m (7)	Comprimento > 600m (3)	TR inferior a 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável (10)	Alteamento a montante ou desconhecido ou que já tenha sido alteado a montante ao longo do ciclo de vida da estrutura (10)	Barragem não instrumentada em desacordo com o projeto (8)
CT = Σ (a até e)				

 Departamento Nacional de Produção Mineral			
QUADRO 3 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS) 1.2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC			
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (f)	Percolação (g)	Deformações e Recalques (h)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (i)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferrugem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)
EC = $\sum (f \text{ até } i)$			

 Departamento Nacional de Produção Mineral			
QUADRO 3 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS) 1.2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC			
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (f)	Percolação (g)	Deformações e Recalques (h)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (i)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferrugem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)
EC = $\sum (f \text{ até } i)$			

 Departamento Nacional de Produção Mineral			
QUADRO 5 - CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA (RESÍDUOS E REJEITOS)			
Volume Total do Reservatório (a)	Existência de população a jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto sócio-econômico (d)
Muito Pequeno < = 500 mil m³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	INSIGNIFICANTE (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (0)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0)
Pequeno 500 mil a 5 milhões m³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	POUCO SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (2)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
Médio 5 milhões a 25 milhões m³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)	SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (6)	MÉDIO (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)
Grande 25 milhões a 50 milhões m³ (4)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)	MUITO SIGNIFICATIVO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A – Não Inertes, segundo a NBR 10004 da ABNT) (8)	ALTO (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)
Muito Grande > = 50 milhões m³ (5)	-	MUITO SIGNIFICATIVO AGRAVADO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I – Perigosos segundo a NBR 10004 da ABNT) (10)	-
DPA= \sum (a até d)			